

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de Aeroespacial

### Efecto escala en la resistencia a tracción de laminados de material compuesto

Autor: María José Peña Manrique

Tutor: Elena Correa Montoto

María Luisa Velasco López

**Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Aeroespacial

# **Efecto escala en la resistencia a tracción de laminados de material compuesto**

Autor:

María José Peña Manrique

Tutor:

Elena Correa Montoto

María Luisa Velasco López

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017





Proyecto Fin de Carrera: Efecto escala en la resistencia a tracción de laminados de material compuesto

Autor: María José Peña Manrique

Tutor: Elena Correa Montoto  
María Luisa Velasco López

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



*A mis padres*

*A mi hermana*

*A mis sobrinas*



# Agradecimientos

---

La realización del presente proyecto no habría sido posible sin la colaboración de múltiples personas.

En primer lugar, agradecer a mis tutoras, Elena y María Luisa, por darme la oportunidad de afrontar este reto y su apoyo y seguimiento constante. Al equipo del LERM por acogerme en la familia que conforman y hacerme formar parte de ella. En particular, gracias a Miguel y a María Luisa por la ayuda en el proceso de fabricación, a José Ramón y Antonio por estar siempre disponibles para ayudar ante cualquier duda y problema, y a Isabel por todos los meses dedicados a enseñarme la preparación de muestras y observación en el microscopio, la disposición y dedicación dada como si de su propio proyecto se tratara.

Gracias también a mi familia por su apoyo y preocupación constante. Sobre todo a mis padres, por su cariño y paciencia y no dejarme desistir nunca, el camino recorrido no es solo mío, si no de los tres.

A todos ellos, gracias.



# Resumen

---

El objetivo del presente trabajo es ahondar en el llamado efecto a escala, es decir, en el efecto que se refiere al aparente cambio de resistencia que se observa en láminas de material compuesto asociado, entre otros factores, al espesor de la propia lámina, así como a la orientación de las láminas adyacentes. En este trabajo se pretende estudiar este efecto desde el punto de vista del fallo a tracción, es decir, aquél que se produce en laminados unidireccionales en las láminas situadas a  $90^\circ$  ante carga de tracción.

Para ello se han fabricado dos laminados *cross ply* simétricos carbono-epoxy, formados únicamente por láminas a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  con respecto a la dirección de aplicación de la carga, en la que se variará únicamente el espesor de sus láminas a  $90^\circ$ , siendo las secuencias de apilado escogidas  $[0_2, 90_2]_S$  y  $[0_2, 90_4]_S$ .

Una vez fabricados los laminados bajo estudio se han procedido a la determinación de su resistencia llevando a la rotura una serie de probetas de cada panel. Determinadas y analizadas los valores medios de resistencia, se ha procedido a la introducción de daño en las muestras con el objetivo de someterlo a análisis y realizar comparaciones. Para ello se han ensayado una serie de probetas de cada panel a un determinado porcentaje de su propia carga de rotura, y se ha procedido a realizar comparaciones del daño sufrido para el mismo porcentaje de la carga aplicada, así como para el mismo nivel de tensión, por cada laminado.

Para visualizar el daño introducido se ha procedido a la inspección mediante un microscopio óptico. Los resultados obtenidos de la observación microscópica se han dividido en dos escalas, meso y micro, en función de si el daño se observa a nivel de macrogrieta o a nivel interno (fibra-matriz).

En el estudio a escala meso se ha procedido a la determinación de la densidad de macrogrietas en cada una de las muestras ensayadas a distintos niveles de carga y a la comparación de resultados entre ambos laminados. Una vez realizado el recuento de macrogrietas, estas se han clasificado en base a diferencias de comportamiento observadas a escala meso y, así como su posible implicación en la resistencia del material.

Pasando al análisis a escala micro se han observado las probetas a  $\times 500$  y  $\times 1000$  para ver los defectos que se producen entre las láminas o bien a escala fibra matriz. Los defectos a tener en cuenta, ya sea mediante análisis estadísticos que permitan estimar su cuantía en el laminado o de forma cualitativa, han sido: la delaminación, despegues aislados, microgrietas alrededor de una grieta, bifurcación de la macrogrieta o rotura de fibra.

Realizado el análisis a ambas escalas tenidas en cuenta, se relacionan los resultados entre los fallos tenidos en cuenta a distinto nivel y su posible efecto en la resistencia.





<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xxi</b>
<b>Índice de Gráficos</b>	<b>xxxix</b>
<b>Índice de Ecuaciones</b>	<b>xxxix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Contexto y motivación</i>	1
1.1.1 Concepto de material compuesto	1
1.1.2 Breve reseña histórica	2
1.1.3 Motivación	4
1.2 <i>Objetivo del proyecto</i>	4
<b>2 Estructura del trabajo y revisión bibliográfica</b>	<b>7</b>
<b>3 Fabricación de probetas</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Diseño de probetas</i>	15
3.2 <i>Materiales empleados</i>	16
3.2.1 Material compuesto en las probetas	16
3.2.2 Material compuesto en los tacos	16
3.3 <i>Proceso de fabricación</i>	17
3.3.1 Corte del material	17
3.3.2 Apilado de las láminas	18
3.3.3 Fabricación de la bolsa de vacío	19
3.3.4 Curado en autoclave	20
3.3.5 Resanado de los paneles	22
3.3.6 Preparación de los tacos de vidrio	22
3.3.7 Corte de las probetas	23
3.3.8 Trazabilidad de las probetas obtenidas	23
<b>4 Ensayos mecánicos</b>	<b>25</b>
4.1 <i>Equipos y software</i>	25
4.2 <i>Procedimiento experimental</i>	26
4.3 <i>Resultados de los ensayos de tracción</i>	29
4.3.1 Tracción hasta la rotura	29
4.3.2 Tracción hasta un porcentaje de la carga de rotura	40
4.3.3 Resultados extraídos de todas las muestras	58
<b>5 Preparación e inspección de muestras</b>	<b>61</b>
5.1 <i>Preparación de muestras para la inspección</i>	61
5.1.1 Encapsulado de las probetas	61
5.1.2 Lijado y pulido de muestras	64
5.2 <i>Inspección al microscopio</i>	68

5.2.1	Equipos y software	68
5.2.2	Inspección de muestras y captura de imágenes	68
<b>6</b>	<b>Inspección microscópica: Observaciones a escala meso</b>	<b>73</b>
6.1	<i>Densidad de grietas transversales</i>	73
6.1.1	Densidad de grietas transversales: Observaciones en el panel A, $[0_2, 90_2]_S$	74
6.1.2	Densidad de grietas transversales: Observaciones en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$	82
6.1.3	Densidad de grietas transversales: Análisis de resultados	90
6.2	<i>Clasificación de las grietas observadas</i>	97
6.2.1	Grietas transversales: Diferenciación	97
6.2.2	Grietas transversales: Recuento de grietas que no unen.	103
6.2.3	Grietas que no terminan	111
<b>7</b>	<b>Inspección microscópica: Observaciones a escala Micro</b>	<b>117</b>
7.1	<i>Delaminación: Análisis estadístico y cuantificación</i>	117
7.2	<i>Defectos en la sección de las láminas a 90°</i>	131
7.2.1	Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura	131
7.2.2	Probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura	150
7.2.3	Probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura	167
7.2.4	Probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura	176
7.2.5	Probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura	179
7.2.6	Probetas ensayadas al 30% y al 40% de la carga de rotura	181
7.2.7	Heterogeneidades observadas en las muestras	181
7.2.8	Defectos en la sección de las láminas a 90°: Análisis de resultados	182
7.3	<i>Efecto del proceso de lijado y pulido</i>	183
<b>8</b>	<b>Conclusiones y Proyectos futuros</b>	<b>191</b>
	<b>Referencias</b>	<b>194</b>
	<b>ANEXO A</b>	<b>196</b>
	<b>ANEXO B</b>	<b>210</b>
	<b>ANEXO C</b>	<b>227</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1. Valor nominal de las propiedades específicas del material <i>AS4/8552</i>	16
Tabla 4-1. Dimensiones medias de las probetas del panel A ensayadas a rotura.	30
Tabla 4-2. Propiedades de rigidez y resistencia de las probetas 1 a 5 A.	31
Tabla 4-3. Características de resistencia del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	32
Tabla 4-4. Características de rigidez del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	33
Tabla 4-5. Dimensiones medias de las probetas del panel B ensayadas a rotura.	34
Tabla 4-6. Propiedades de rigidez y resistencia de las probetas 1 a 5 B.	35
Tabla 4-7. Características de resistencia del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	35
Tabla 4-8. Características de rigidez del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	36
Tabla 4-9. Resumen de los resultados de resistencia y rigidez obtenidos para cada uno de los laminados fabricados.	37
Tabla 4-10. Deformación y carga de rotura para cada panel.	37
Tabla 4-11. Dimensiones de la probeta del Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 90% de la tensión media de rotura.	41
Tabla 4-12. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de la probeta 25A.	42
Tabla 4-13. Dimensiones de la probeta del Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 90% de la tensión media de rotura.	42
Tabla 4-14. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de la probeta 25B.	43
Tabla 4-15. Dimensiones de las probetas del Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 80% de la tensión media de rotura.	43
Tabla 4-16. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 6 a 10A.	44
Tabla 4-17. Dimensiones de las probetas del Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 80% de la tensión media de rotura.	45
Tabla 4-18. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 6-10B.	46
Tabla 4-19. Dimensiones de las probetas del Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 70% de la tensión de rotura.	46
Tabla 4-20. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 20A y 24A.	47
Tabla 4-21. Dimensiones de las probetas del Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 70% de la tensión media de rotura.	47
Tabla 4-22. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 6 a 10A.	48
Tabla 4-23. Dimensiones de las probetas del Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 60% de la tensión media de rotura.	48
Tabla 4-24. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 21A y 22A.	49
Tabla 4-25. Dimensiones de las probetas del Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 60% de la tensión	

media de rotura.	49
Tabla 4-26. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 21B y 22B.	50
Tabla 4-27. Dimensiones de las probetas del Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 50% de la tensión media de rotura.	50
Tabla 4-28. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 11a 15A.	51
Tabla 4-29. Dimensiones de las probetas del Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 50% de la tensión media de rotura.	52
Tabla 4-30. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 11-15B.	53
Tabla 4-31. Dimensiones de las probetas del Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 40% de la tensión de rotura.	53
Tabla 4-32. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 18A y 19A.	54
Tabla 4-33. Dimensiones de las probetas del Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 40% de la tensión media de rotura.	54
Tabla 4-34. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 18B y 19B.	55
Tabla 4-35. Dimensiones de las probetas del Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 30% de la tensión de rotura.	55
Tabla 4-36. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 16A y 17A.	56
Tabla 4-37. Dimensiones de las probetas del Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 30% de la tensión media de rotura.	57
Tabla 4-38. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 16B y 17B.	57
Tabla 4-39. Características de rigidez del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	58
Tabla 4-40. Características de rigidez del panel B, $[0_2, 90_4]_S$	59
Tabla 5-1. Resumen del proceso de pulido.	68
Tabla 6-1. Densidad de grietas (grietas por centímetro) para la muestra 25A.	74
Tabla 6-2. Densidad de grietas (grietas por centímetro) para las muestras ensayadas al 80% y valor medio.	76
Tabla 6-3. Valores medios de lo obtenido para cada muestra	77
Tabla 6-4. Valores medios de lo obtenido para cada muestra.	78
Tabla 6-5. Valores medios de lo obtenido para cada muestra ensayada al 50%.	80
Tabla 6-6. Valores medios de lo obtenido para cada muestra ensayada al 40%.	81
Tabla 6-7. Valores medios de lo obtenido para cada muestra del panel A ensayada al 30%.	81
Tabla 6-8. Valores medios de lo obtenido para cada muestra del panel B ensayada al 90%.	82
Tabla 6-9. Valores medios de lo obtenido para cada muestra del panel B, ensayada al 80%.	84
Tabla 6-10. Valores medios de lo obtenido para cada muestra del panel B, ensayada al 70%.	85
Tabla 6-11. Valores medios de lo obtenido para cada muestra del panel B, ensayadas al 60%.	86
Tabla 6-12. Valores medios de lo obtenido para cada muestra.	88
Tabla 6-13. Valores medios de lo obtenido para cada muestra del panel B ensayada al 40%.	89
Tabla 6-14. Valores medios de lo obtenido para cada muestra del panel B ensayada al 30%.	90
Tabla 6-15. Valores nominales y experimentales necesarios para el cálculo de la tensión de la lámina	

a 90° en cada uno de los laminados.	95
Tabla 6-16. Tensión que soportan las láminas a 90° para cada nivel de carga según la Teoría General del Laminado.	95
Tabla 6-17. Densidad de grietas rectas y oblicuas en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	99
Tabla 6-18. Recuento de grietas que unen y discontinuas para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	108
Tabla 6-19. Recuento de grietas que unen y discontinuas para el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	109
Tabla 6-20. Densidad de grietas incompletas (grietas/cm) para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y para el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	113
Tabla 7-1. Densidad delaminaciones (delaminación/cm) para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	122
Tabla 7-2. Densidad delaminaciones (delaminación/cm) para el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	123
Tabla 7-3. Ciclos de pulido llevados a cabos en la probeta 25B en el análisis del pulido.	184
Tabla 0-1. Dimensiones probeta 1A.	199
Tabla 0-2. Dimensiones probeta 2A.	199
Tabla 0-3. Dimensiones probeta 3A.	199
Tabla 0-4. Dimensiones probeta 4A.	199
Tabla 0-5. Dimensiones de la probeta 5A.	200
Tabla 0-6. Dimensiones de la probeta 25A.	200
Tabla 0-7. Dimensiones probeta 6A.	201
Tabla 0-8. Dimensiones probeta 7A.	201
Tabla 0-9. Dimensiones probeta 8A.	201
Tabla 0-10. Dimensiones probeta 9A.	201
Tabla 0-11. Dimensiones de la probeta 10A.	201
Tabla 0-12. Dimensiones probeta 20A.	202
Tabla 0-13. Dimensiones probeta 24A.	202
Tabla 0-14. Dimensiones probeta 21A.	202
Tabla 0-15. Dimensiones probeta 22A.	202
Tabla 0-16. Dimensiones probeta 11A.	203
Tabla 0-17. Dimensiones probeta 12A.	203
Tabla 0-18. Dimensiones probeta 13A.	203
Tabla 0-19. Dimensiones probeta 14A.	203
Tabla 0-20. Dimensiones de la probeta 15A.	203
Tabla 0-21. Dimensiones probeta 18A.	204
Tabla 0-22. Dimensiones probeta 19A.	204
Tabla 0-23. Dimensiones probeta 16A.	204
Tabla 0-24. Dimensiones probeta 17A.	204
Tabla 0-25. Dimensiones probeta 1B.	205
Tabla 0-26. Dimensiones probeta 2B.	205
Tabla 0-27. Dimensiones probeta 3B.	205
Tabla 0-28. Dimensiones probeta 4B.	205

Tabla 0-29. Dimensiones de la probeta 5B.	205
Tabla 0-30. Dimensiones de la probeta 25B.	206
Tabla 0-31. Dimensiones probeta 6B.	206
Tabla 0-32. Dimensiones probeta 7B	206
Tabla 0-33. Dimensiones probeta 8B.	207
Tabla 0-34. Dimensiones probeta 9B.	207
Tabla 0-35. Dimensiones de la probeta 9B.	207
Tabla 0-36. Dimensiones probeta 23B.	207
Tabla 0-37. Dimensiones probeta 24B.	207
Tabla 0-38. Dimensiones probeta 21B.	208
Tabla 0-39. Dimensiones probeta 22B.	208
Tabla 0-40. Dimensiones probeta 11B.	208
Tabla 0-41. Dimensiones probeta 12B.	208
Tabla 0-42. Dimensiones probeta 13B.	209
Tabla 0-43. Dimensiones probeta 14B	209
Tabla 0-44. Dimensiones de la probeta 15B.	209
Tabla 0-45. Dimensiones probeta 18B.	209
Tabla 0-44. Dimensiones de la probeta 19B.	209
Tabla 0-47. Dimensiones probeta 16B.	210
Tabla 0-48. Dimensiones probeta 17B.	208
Tabla 0-1. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 25A.	211
Tabla 0-2. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 6A.	211
Tabla 0-3. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 7A.	214
Tabla 0-4. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 8A.	214
Tabla 0-5. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 9A.	214
Tabla 0-6. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 10A.	215
Tabla 0-7. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 20A.	215
Tabla 0-8. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 24A.	215
Tabla 0-9. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 21A.	216
Tabla 0-10. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 22A.	216
Tabla 0-11. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 11A.	217
Tabla 0-12. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 12A.	217
Tabla 0-13. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 13A.	218
Tabla 0-14. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 14A.	218
Tabla 0-15. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 15A.	218
Tabla 0-16. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 18A.	219
Tabla 0-17. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 19A.	219
Tabla 0-18. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 16A.	220
Tabla 0-19. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 17A.	220

Tabla 0-20. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 25B.	221
Tabla 0-21. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 6B.	221
Tabla 0-22. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 7B.	222
Tabla 0-23. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 8B.	222
Tabla 0-24. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 9B.	222
Tabla 0-25. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 10B.	223
Tabla 0-26. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 23B.	223
Tabla 0-27. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 24B.	223
Tabla 0-28. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 21B.	224
Tabla 0-29. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 22B.	224
Tabla 0-30. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 11B.	225
Tabla 0-31. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 12B.	225
Tabla 0-32. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 13B.	226
Tabla 0-33. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 14B.	226
Tabla 0-34. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 15B.	226
Tabla 0-35. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 18B.	227
Tabla 0-36. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 19B.	227
Tabla 0-37. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 16B.	228
Tabla 0-38. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 17B.	228
Tabla 0-1. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 25B.	229
Tabla 0-2. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 6B.	229
Tabla 0-3. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 7B.	230
Tabla 0-4. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 8B.	230
Tabla 0-5. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 9B.	230
Tabla 0-6. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 10B.	231
Tabla 0-7. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 23B.	231
Tabla 0-8. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 24B.	231
Tabla 0-9. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 21B.	232
Tabla 0-10. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 22B.	232
Tabla 0-11. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 11B.	231
Tabla 0-12. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 12B.	231
Tabla 0-13. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 13B.	232
Tabla 0-14. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 14B.	232
Tabla 0-15. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 15B.	232
Tabla 0-16. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 18B.	233
Tabla 0-17. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 19B.	233
Tabla 0-18. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 16B.	234
Tabla 0-19. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 17B.	234





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Morfología de material compuesto reforzado con fibras continuas-discontinuas en diferentes orientaciones.	1
Figura 1-2. Evolución de los materiales compuestos en aviación comercial en los últimos 45 años.	2
Figura 1-3. Esquema de la fracción volumétrica de peso de la estructura del B787 (a); Esquema de la fracción volumétrica de peso de la estructura del A320(b).	3
Figura 1-4. . “Cross-ply” con fibras orientadas a 0° (superior) y 90°.	4
Figura 2-1. Ejes de referencia.	8
Figura 2-2. Configuración de láminas.	9
Figura 2-3. Iniciación y propagación de una grieta transversal bajo la aplicación de cargas normales según análisis numéricos [3].	12
Figura 2-4. Representación gráfica de una delaminación de un laminado $[0,90]_S$ .	12
Figura 3-1. Esquema de las dimensiones de los laminados objeto de estudio en el presente trabajo.	15
Figura 3-2. Dimesiones de las probetas a ensayar según lo estipulado en la norma IPS05-01-001-03 [6].	17
Figura 3-3 . Láminas cortadas con las orientaciones requeridas.	18
Figura 3-4. Cúter, escuadra y cartabón empleados en el corte de láminas de material.	18
Figura 3-5. Espátula de Nylon usada en el apilado	18
Figura 3-6. Elementos de una bolsa de vacío.	19
Figura 3-7. Paneles fabricados con el cromato sobre la placa de aluminio (a); Proceso de realización de vacío sobre la bolsa de vacío.	20
Figura 3-8. Máquina de corte empleada en el proceso de fabricación.	22
Figura 3-9. Láminados con los talones de vidrio aplicados a presión (a); Laminados con los talones de vidrio en la bolsa de vacío(b).	23
Figura 3-10. Conjunto de probetas obtenidas para el panel A(a); Conjunto de probetas obtenidas para el panel B (b).	24
Figura 4-1. Máquina Universal de Ensayos Instron 4483 y Máquina Universal de Ensayos Instron 4482.	25
Figura 4-2. Extensómetro 2630-112.	26
Figura 4-3. Pie de rey.	26
Figura 4-4. Mordaza empleada en los ensayos de tracción.	27
Figura 4-5. Colocación de la probeta (a); Dirección de apriete de la mordaza(b); Colocación del extensómetro(c).	27
Figura 4-6. Programa de gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron.Esquema pantalla 1.	28
Figura 4-7. Programa de gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron. Esquema pantalla 2.	28

Figura 4-8. Zona de rotura de las probetas: 1A (a); 2A (b); 3A (c); 4A (d); 5A (e).	38
Figura 4-9. Zona de rotura de las probetas: 1B(a); 2B (b); 3B (c); 4B (d); 5B (e).	39
Figura 5-1. Elementos necesarios para el encapsulado.	62
Figura 5-2. Probetas (a); Marcas de corte de las probetas (b); Corte de las probetas para encapsulado(c).	62
Figura 5-3. Colocación de muestras en el molde de encapsulado (a); Vertido de la resina (b); Desmoldeo (c); Nomenclatura en las muestras (d).	64
Figura 5-4. Pantalla LCD de la máquina programable <i>Saphir 520</i> .	64
Figura 5-5. Equipo de lijado y pulido.	65
Figura 5-6. Lija <i>SiC #320</i> y soporte <i>MD Gekko</i> (a); <i>Lijado plano</i> (b).	66
Figura 5-7. Sentido normal de giro del cabezal de la pulidora(a); Sentido contrario(b)	67
Figura 5-8. Visualización de una muestra en el <i>Perfect Image</i> .	69
Figura 5-9. Esquema del procedimiento para realizar una fotocomposición.	70
Figura 6-1. Grietas transversales en un laminado formado por laminas a 90° y 0° respecto a la dirección de aplicación de la carga.	73
Figura 6-2. Fragmentos de la muestra 25A, observada a x25.	74
Figura 6-3. Fragmentos de la muestra 6A, observada a x25.	75
Figura 6-4. Fragmentos de la muestra 7A, observada a x25.	75
Figura 6-5. Fragmentos de la muestra 8A, observada a x25.	75
Figura 6-6. Fragmentos de la muestra 9A, observada a x25.	75
Figura 6-7. Fragmentos de la muestra 10A, observada a x25.	75
Figura 6-8. Fragmentos de la muestra 20A, observada a x25.	76
Figura 6-9. Fragmentos de la muestra 24A, observada a x25.	77
Figura 6-10. Fragmentos de la muestra 21A, observada a x25.	77
Figura 6-11. Fragmentos de la muestra 22A, observada a x25.	78
Figura 6-12. Fragmentos de la muestra 11A, observada a x25.	78
Figura 6-13. Fragmentos de la muestra 12A, observada a x25.	79
Figura 6-14. Fragmentos de la muestra 13A, observada a x25.	79
Figura 6-15. Fragmentos de la muestra 14A, observada a x25.	79
Figura 6-16. Fragmentos de la muestra 15A, observada a x25.	79
Figura 6-17. Fragmentos de la muestra 18A, observada a x25.	80
Figura 6-18. Fragmentos de la muestra 19A, observada a x25.	80
Figura 6-19. Fragmentos de la muestra 16A, observada a x25.	81
Figura 6-20. Fragmentos de la muestra 17A, observada a x25.	81
Figura 6-21. Fragmentos de la muestra 25B, observada a x25.	82
Figura 6-22. Fragmentos de la muestra 6B, observada a x25.	83
Figura 6-23. Fragmentos de la muestra 7B, observada a x25.	83
Figura 6-24. Fragmentos de la muestra 8B, observada a x25.	83
Figura 6-25. Fragmentos de la muestra 9B, observada a x25.	83
Figura 6-26. Fragmentos de la muestra 10B, observada a x25.	84

Figura 6-27. Fragmentos de la muestra 23B, observada a x25.	84
Figura 6-28. Fragmentos de la muestra 24B, observada a x25.	85
Figura 6-29. Fragmentos de la muestra 21B, observada a x25.	86
Figura 6-30. Fragmentos de la muestra 22B, observada a x25.	86
Figura 6-31. Fragmentos de la muestra 11B, observada a x25.	87
Figura 6-32. Fragmentos de la muestra 12B, observada a x25.	87
Figura 6-33. Fragmentos de la muestra 13B, observada a x25.	87
Figura 6-34. Fragmentos de la muestra 14B, observada a x25.	87
Figura 6-35. Fragmentos de la muestra 15B, observada a x25.	88
Figura 6-36. Fragmentos de la muestra 18B, observada a x25.	88
Figura 6-37. Fragmentos de la muestra 19B, observada a x25.	89
Figura 6-38. Fragmentos de la muestra 16B, observada a x25.	89
Figura 6-39. Fragmentos de la muestra 17B, observada a x25.	90
Figura 6-40. Ejemplo de una grieta transversal correspondiente a la muestra 6B (a); Ejemplo de una grieta que no termina al lado de una grieta transversal correspondiente a la muestra 6B (b).	97
Figura 6-41. Grietas rectas correspondientes a la muestra 9A.	98
Figura 6-42. Ejemplo de dos grietas transversales rectas correspondientes a la muestra 9B (a); Ejemplo de una grieta transversal desviada (derecha) al lado de una grieta recta(izquierda) correspondiente a la muestra 9B (b).	98
Figura 6-43. Ejemplo de una grieta desviada a la izquierda de una grieta transversal correspondiente a la muestra 8B (a); Ejemplo de una grieta desviada a la derecha de una grieta transversal correspondiente a la muestra 8B (b).	103
Figura 6-44. Ejemplo de grietas desviadas entre dos grietas transvesales rectas correspondientes a la muestra 25B.	103
Figura 6-45. Grietas discontinuas visualizadas en las muestras 6A(a); 7A(b); 8A(c); 9A(d); 10A(d).	104
Figura 6-46. Grietas discontinuas visualizadas en las muestras 6B(a); 7B(b); 8B(c); 9B(d); 10B(d).	105
Figura 6-47. Micrografía a x200 aumentos de una grieta discontinua en la muestra 25B.	106
Figura 6-48. Grieta discontinua en la 11A.	106
Figura 6-49. Grieta discontinua en la 21A.	106
Figura 6-50. Grieta discontinua en la 20A.	107
Figura 6-51. Grieta discontinua en la 25A.	107
Figura 6-52. Grieta discontinua en la 7B.	107
Figura 6-53. Grieta discontinua en la 14B.	107
Figura 6-54. Grieta discontinua en la 23B.	107
Figura 6-55. Grieta discontinua en la 25B.	107
Figura 6-56. Grieta incompleta correspondiente a la muestra 23B(a); 25B(b).	111
Figura 6-57. Grieta incompleta en la 22A.	112
Figura 6-58. Grieta incompleta en la 24A.	112
Figura 6-59. Grieta incompleta en la 23B.	112

Figura 6-60. Grieta incompleta en la 25B.	112
Figura 6-61. Grieta incompleta en la 10A.	115
Figura 6-62. Grieta incompleta en la 7A	115
Figura 6-63. Grieta incompleta en en la 25A.	115
Figura 6-64. Grieta incompleta en la 6B.	116
Figura 6-65. Grietas incompletas inclinadas entre dos grietas rectas en la muestra 25B.	116
Figura 7-1. Representación gráfica de una delaminación en un laminado $[0,90]_S$ .	117
Figura 7-2. Delaminación en la 13A.	118
Figura 7-3. Delaminación en la 22A.	118
Figura 7-4. Delaminación en la 13B.	118
Figura 7-5. Delaminación en la 15B.	118
Figura 7-6. Delaminación en la 7B.	119
Figura 7-7. Delaminación en la 7B.	119
Figura 7-8. Delaminación en la 23B.	119
Figura 7-9. Delaminación en la 9B.	119
Figura 7-10. Delaminación en la 25B.	119
Figura 7-11. Delaminación en la 25A.	119
Figura 7-12. Delaminación en la 7B.	120
Figura 7-13. Delaminación en la 14B.	120
Figura 7-14. Delaminación en la 7B.	120
Figura 7-15. Delaminación en la 7B.	120
Figura 7-16. Delaminación en la 7B.	120
Figura 7-17. Delaminación en la 8A.	120
Figura 7-18. Delaminación en la 22B.	121
Figura 7-19. Delaminación en la 7B.	121
Figura 7-20. Delaminación en la 9B.	121
Figura 7-21. Delaminación en la 25B.	121
Figura 7-22. Terminación de grieta en la 25A.	131
Figura 7-23. Terminación de grieta en la 25A.	131
Figura 7-24. Terminación de grieta en la 25A.	132
Figura 7-25. Terminación de grieta en la 25A.	132
Figura 7-26. Terminación de grieta en la 25A.	132
Figura 7-27. Terminación de grieta en la 25A.	132
Figura 7-28. Terminación de grieta en la 25B.	133
Figura 7-29. Terminación de grieta en la 25B.	133
Figura 7-30. Terminación de grieta en la 25B.	133
Figura 7-31. Terminación de grieta en la 25B.	133
Figura 7-32. Terminación de grieta en la 25B.	133
Figura 7-33. Terminación de grieta en la 25B.	133

Figura 7-34. Terminación de grieta en la 25B.	134
Figura 7-35. Terminación de grieta en la 25B.	134
Figura 7-36. Terminación de grieta en la 25B.	134
Figura 7-37. Terminación de grieta en la 25B.	134
Figura 7-38. Terminación de grieta en la 25B.	134
Figura 7-39. Terminación de grieta en la 25B.	134
Figura 7-40. Terminación de grieta en la 25B.	135
Figura 7-41. Terminación de grieta en la 25B.	135
Figura 7-42. Despegues en la 25B.	135
Figura 7-43. Despegues en la 25B.	135
Figura 7-44. Despegues en la 25B.	136
Figura 7-45. Despegues en la 25A.	136
Figura 7-46. Despegue en la 25A.	137
Figura 7-47. Despegue en la 25A.	137
Figura 7-48. Despegue en la 25A.	137
Figura 7-49. Despegue en la 25A.	137
Figura 7-50. Despegue en la 25A.	137
Figura 7-51. Despegue en la 25A.	137
Figura 7-52. Despegues en la 25B.	138
Figura 7-53. Despegues en la 25B.	138
Figura 7-54. Despegues en la 25B.	138
Figura 7-55. Despegues en la 25B.	138
Figura 7-56. Despegues en la 25B.	138
Figura 7-57. Despegues en la 25B.	138
Figura 7-58. Microgrieta en la 25A.	139
Figura 7-59. Microgrieta en la 25A.	139
Figura 7-60. Microgrieta en la 25A.	139
Figura 7-61. Microgrieta en la 25B.	139
Figura 7-62. Microgrieta en la 25B.	140
Figura 7-63. Microgrieta en la 25B.	140
Figura 7-64. Microgrieta en la 25B.	140
Figura 7-65. Microgrieta en la 25B.	140
Figura 7-66. Microgrieta en la 25B.	140
Figura 7-67. Microgrieta en la 25B.	140
Figura 7-68. Grieta continua en la 25A.	141
Figura 7-69. Despegue bilateral en la 25A.	141
Figura 7-70. Bifurcación en la 25A.	142
Figura 7-70. Bifurcación en la 25A.	142
Figura 7-72. Grieta continua en la 25B.	143

Figura 7-73. Grieta continua en la 25B.	143
Figura 7-74. Bifurcación en la 25B.	144
Figura 7-75. Bifurcación en la 25B.	144
Figura 7-76. Bifurcación en la 25B.	145
Figura 7-77. Bifurcación en la 25B.	145
Figura 7-78. Grieta discontinua en la 25B.	146
Figura 7-79. Grieta discontinua en la 25B.	146
Figura 7-80. Grieta discontinua en la 25B.	146
Figura 7-81. Rotura de fibra en la 25A.	146
Figura 7-82. Rotura de fibra en la 25A.	146
Figura 7-83. Rotura de fibra en la 25B.	146
Figura 7-84. Rotura de fibra en la 25B.	147
Figura 7-85. Rotura de fibra 25B.	147
Figura 7-86. Grieta incompleta en la 25A.	147
Figura 7-87. Grieta incompleta en la 25A.	147
Figura 7-88. Grieta incompleta en la 25A.	148
Figura 7-89. Grieta incompleta en la 25A.	148
Figura 7-90. Grieta incompleta en la 25A.	148
Figura 7-91. Grieta incompleta en la 25A.	148
Figura 7-92. Grieta incompleta en la 25A.	148
Figura 7-93. Despegues en la 25B.	148
Figura 7-94. Poro en la 25A.	149
Figura 7-95. Poro en la 25A.	149
Figura 7-96. Poro en la 25A.	149
Figura 7-97. Poro en la 25A.	149
Figura 7-99. Poro en la 25B.	150
Figura 7-99. Poro en la 25B.	150
Figura 7-100. Despegues en la 25B.	150
Figura 7-101. Poro en la 25B.	150
Figura 7-102. Terminación de grieta en la 7A.	151
Figura 7-103. Terminación de grieta en la 7A.	151
Figura 7-104. Terminación de grieta en la 7A.	151
Figura 7-105. Terminación de grieta en la 9A.	151
Figura 7-106. Terminación de grieta en la 10A.	152
Figura 7-107. Terminación de grieta en la 10A.	152
Figura 7-108. Terminación de grieta en la 6B.	152
Figura 7-109. Terminación de grieta en la 6B.	152
Figura 7-110. Terminación de grieta en la 6B.	153
Figura 7-111. Terminación de grieta en la 6B.	153

Figura 7-112. Terminación de grieta en la 8B.	153
Figura 7-113. Terminación de grieta en la 8B.	154
Figura 7-114. Terminación de grieta en la 7B.	154
Figura 7-115. Terminación de grieta en la 7B.	154
Figura 7-116. Terminación de grieta en la 6A.	155
Figura 7-117. Terminación de grieta en la 6A.	155
Figura 7-118. Terminación de grieta en la 6A.	155
Figura 7-119. Terminación de grieta en la 6A.	155
Figura 7-120. Despegue en la 7A.	156
Figura 7-121. Despegue en la 7B.	156
Figura 7-122. Despegue en la 7B.	156
Figura 7-123. Despegue en la 8B.	156
Figura 7-124. Microgrieta en la 6A.	157
Figura 7-125. Microgrieta en la 6A.	157
Figura 7-126. Microgrieta en la 7A.	157
Figura 7-127. Microgrieta en la 7A.	157
Figura 7-128. Microgrieta en la 10A.	157
Figura 7-129. Microgrieta en la 10A.	157
Figura 7-130. Microgrieta en la 6B.	158
Figura 7-131. Microgrieta en la 6B.	158
Figura 7-132. Microgrieta en la 6B.	158
Figura 7-133. Microgrieta en la 6B.	158
Figura 7-134. Microgrieta en la 7B.	159
Figura 7-135. Microgrieta en la 8B.	159
Figura 7-136. Grieta continua en la 6A.	160
Figura 7-137. Bifurcación en la 7A.	160
Figura 7-138. Bifurcación en la 7A.	160
Figura 7-139. Bifurcación en la 10A.	160
Figura 7-140. Grieta discontinua en la 6A.	160
Figura 7-141. Grieta discontinua en la 7A.	160
Figura 7-142. Grieta discontinua en la 7A.	161
Figura 7-143. Grieta discontinua en la 7A.	161
Figura 7-144. Grieta continua en la 6B.	162
Figura 7-145. Bifurcación en la 6B.	162
Figura 7-146. Bifurcación en la 6B.	162
Figura 7-147. Bifurcación en la 7B.	162
Figura 7-148. Bifurcación en la 7B.	162
Figura 7-149. Bifurcación en la 7B.	162
Figura 7-150. Grieta que no une en la 7B.	163

Figura 7-151. Rotura de fibra en la 6A.	163
Figura 7-152. Rotura de fibra en la 6A.	163
Figura 7-153. Rotura de fibra en la 7B.	164
Figura 7-154. Rotura de fibra en la 7B.	164
Figura 7-155. Grieta incompleta en la 7A.	164
Figura 7-156. Grieta incompleta en la 8A.	164
Figura 7-157. Grieta incompleta en la 6B.	165
Figura 7-158. Grieta incompleta en la 6B.	165
Figura 7-159. Poro en la 6A.	165
Figura 7-160. Poro en la 7A.	165
Figura 7-161. Poro en la 7A.	166
Figura 7-162. Poro en la 9A.	166
Figura 7-163. Poro en la 10A.	166
Figura 7-164. Poro en la 8B.	166
Figura 7-165. Poro en la 8B.	166
Figura 7-166. Poro en la 8B.	166
Figura 7-167. Terminación de grieta en la 20A.	167
Figura 7-168. Terminación de grieta en la 20A.	167
Figura 7-169. Terminación de grieta en la 24A.	168
Figura 7-170. Terminación de grieta en la 24A.	168
Figura 7-171. Terminación de grieta en la 23B.	168
Figura 7-172. Terminación de grieta en la 23B.	168
Figura 7-173. Terminación de grieta en la 24B.	168
Figura 7-174. Terminación de grieta en la 24B.	168
Figura 7-175. Terminación de grieta en la 23B.	169
Figura 7-176. Terminación de grieta en la 23B.	169
Figura 7-177. Despegue en la 20A.	169
Figura 7-178. Despegue en la 20A.	169
Figura 7-179. Despegue en la 20A.	170
Figura 7-180. Despegue en la 20A.	170
Figura 7-181. Despegue en la 20A.	170
Figura 7-182. Despegue en la 20A.	170
Figura 7-183. Despegue en la 23B.	171
Figura 7-184. Despegue en la 23B.	171
Figura 7-185. Despegue en la 23B.	171
Figura 7-186. Despegue en la 23B.	171
Figura 7-187. Despegue en la 23B.	171
Figura 7-188. Despegue en la 23B.	171
Figura 7-189. Microgrieta en la 20A.	172



Figura 7-190. Microgrieta en la 20A.	172
Figura 7-191. Microgrieta en la 20A.	172
Figura 7-192. Microgrieta en la 24A.	172
Figura 7-193. Microgrieta en la 23B.	173
Figura 7-194. Microgrieta en la 23B.	173
Figura 7-195. Bifurcación en la 20A.	173
Figura 7-196. Bifurcación en la 20A.	173
Figura 7-197. Grieta que no une en la 20A.	174
Figura 7-198. Grieta que no une en la 20A.	174
Figura 7-199. Bifurcación en la 23B.	174
Figura 7-200. Bifurcación en la 23B.	174
Figura 7-201. Bifurcación en la 23B.	175
Figura 7-202. Grieta discontinua en la 23B.	175
Figura 7-203. Grieta incompleta en la 20A.	175
Figura 7-204. Grieta incompleta en la 23B.	175
Figura 7-205. Bifurcación en la 21A.	176
Figura 7-206. Bifurcación en la 21B.	176
Figura 7-207. Despegue en la 21B.	177
Figura 7-208. Despegue en la 21A.	177
Figura 7-209. Microgrieta en la 22A.	177
Figura 7-210. Microgrieta en la 21A.	177
Figura 7-211. Microgrieta en la 21A.	178
Figura 7-212. Microgrieta en la 22B.	178
Figura 7-213. Bifurcación en la 21A.	178
Figura 7-214. Bifurcación en la 21B.	178
Figura 7-215. Bifurcación en la 12B.	180
Figura 7-216. Despegue en la 12A.	180
Figura 7-217. Bifurcación en la 14A.	180
Figura 7-218. Grieta discontinua en la 14A.	180
Figura 7-219. Bifurcación en la 11B.	180
Figura 7-220. Bifurcación en la 13B.	180
Figura 7-221. Defecto en la 6B.	181
Figura 7-222. Defecto en la 7A.	181
Figura 7-223. Defecto en la 7A.	182
Figura 7-224. Defecto en la 8B.	182
Figura 7-225. Defecto en la 23B.	182
Figura 7-226. Defecto en la 15B.	182
Figura 7-227. Fragmento de la muestra 7B, observada a x25	183
Figura 7-228. Fragmento de la muestra 25B, observada a x25	183

Figura 7-229. Fragmento de grieta de la muestra 7B, observada a x1000.	184
Figura 7-230. Fragmento de grieta de la muestra 25B, observada a x1000.	184
Figura 7-231. Grieta 12B del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x50.	185
Figura 7-232. Grieta 12B del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x50.	185
Figura 7-233. Grieta 12B del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x500.	185
Figura 7-234. Grieta 12B del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x500.	185
Figura 7-235. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 2, observada a x500.	186
Figura 7-236. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 3, observada a x500.	186
Figura 7-237. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x500.	186
Figura 7-238. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x500.	186
Figura 7-239. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 2, observada a x500.	187
Figura 7-240. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 3, observada a x500.	187
Figura 7-241. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x500.	187
Figura 7-242. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x500.	187
Figura 7-243. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 1, observada a x1000.	190
Figura 7-244. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 2, observada a x1000.	190
Figura 7-245. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 3, observada a x1000.	190
Figura 7-246. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x1000.	190
Figura 7-247. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x1000.	191
Figura 0-1. Probeta del panel A ensayadas al 90% de su carga de rotura.	198
Figura 0-2. Probeta del panel A ensayadas al 70% de su carga de rotura.	200
Figura 0-3. Probeta del panel A ensayadas al 60% de su carga de rotura.	200
Figura 0-4. Probeta del panel A ensayadas al 40% de su carga de rotura.	202
Figura 0-5. Probeta del panel A ensayadas al 30% de su carga de rotura.	202
Figura 0-6. Probeta del panel B ensayadas al 90% de su carga de rotura.	204
Figura 0-7. Probeta del panel B ensayadas al 70% de su carga de rotura.	206
Figura 0-8. Probeta del panel B ensayadas al 60% de su carga de rotura.	206
Figura 0-9. Probeta del panel B ensayadas al 40% de su carga de rotura.	208
Figura 0-10. Probeta del panel B ensayadas al 30% de su carga de rotura.	208

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1. Evolución de la temperatura del aire en el autoclave.	21
Gráfico 3-2. Evolución de la presión del aire en el autoclave	21
Gráfico 3-3. Evolución de la presión en la bolsa de vacío	21
Gráfico 4-2. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo a rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	31
Gráfico 4-3. Resistencia de cada probeta del panel A y valor medio.	32
Gráfico 4-4. Rigidez de las muestras ensayadas a rotura y valor medio.	33
Gráfico 4-5. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo a rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	34
Gráfico 4-6. Resistencia de cada probeta del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , y valor medio.	35
Gráfico 4-7. Rigidez de las muestras ensayadas a rotura del panel B y valor medio.	36
Gráfico 4-8. . Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo a rotura del panel 8B.	40
Gráfico 4-9. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 90% de la carga de rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	41
Gráfico 4-10. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 90% de la carga de rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	42
Gráfico 4-11. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 80% de la carga de rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	44
Gráfico 4-12. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 80% de la carga de rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	45
Gráfico 4-13. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 70% de la carga de rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	46
Gráfico 4-14. . Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 70% de la carga de rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	47
Gráfico 4-15. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 60% de la carga de rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	48
Gráfico 4-16. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 60% de la carga de rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	49
Gráfico 4-17. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 50% de la carga de rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	51
Gráfico 4-18. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 50% de la carga de rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	52
Gráfico 4-19. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 40% de la carga de rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	53
Gráfico 4-20. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 40% de la carga de rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	55
Gráfico 4-21. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 40% de la carga de rotura del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	56
Gráfico 4-22. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para el ensayo al 30% de la carga de rotura del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	57
Gráfico 4-23. Rigidez de cada muestra del panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y valor medio.	58
Gráfico 4-24. Rigidez de cada muestra del panel B, $[0_2, 90_4]_S$ , y valor medio.	59
Gráfico 6-1. Evolución del número de grietas por centímetro en función de la tensión aplicada para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	91
Gráfico 6-2. Evolución del número de grietas por centímetro en función de la tensión aplicada en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	92
Gráfico 6-3. Densidad de grieta frente a porcentaje de la tensión de rotura media para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ .	93
Gráfico 6-4. Densidad de grieta frente a tensión para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ .	94
Gráfico 6-5. Densidad de grieta frente a tensión de la lámina a 90 °para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ .	96
Gráfico 6-6. Evolución del número de grietas transversales por centímetro en función de la tensión	

aplicada en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	100
Gráfico 6-7. Evolución del número de grietas rectas por centímetro en función de la tensión aplicada en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	100
Gráfico 6-8. Evolución del número de grietas oblicuas por centímetro en función de la tensión aplicada en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	101
Gráfico 6-9. Evolución del número de grietas rectas y oblicuas por centímetro en función del porcentaje de tensión aplicada en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	102
Gráfico 6-10. Densidad de grietas discontinuas frente a tensión media aplicada para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ .	110
Gráfico 6-11. Porcentaje de grietas discontinuas respecto de las totales frente a tensión media aplicada para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ .	110
Gráfico 6-12. Densidad de grietas incompletas frente a porcentaje de carga aplicada para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ .	114
Gráfico 6-13. Densidad de grietas incompletas frente a porcentaje de carga aplicada para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ .	114
Gráfico 7-1. Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	124
Gráfico 7-2. Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	124
Gráfico 7-3. Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ , frente a porcentaje de carga.	125
Gráfico 7-4. Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ frente a tensión.	126
Gráfico 7-5. Densidad grietas transversales (grieta/cm) para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ , frente a tensión.	127
Gráfico 7-6. Clasificación de la densidad de delaminaciones de cada tipo y contribución a la densidad de delaminaciones total para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .	128
Gráfico 7-7. Clasificación de la densidad de delaminaciones de cada tipo y contribución a la densidad de delaminaciones total para el panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .	129
Gráfico 7-8. Porcentaje de terminaciones de grieta que terminan en delaminación para el panel A, $[0_2, 90_2]_S$ , y B, $[0_2, 90_4]_S$ , frente al porcentaje de carga aplicado.	130

# ÍNDICE DE ECUACIONES

---

Ecuación (2-1)	7
Ecuación (2-2)	8
Ecuación (2-3)	8
Ecuación (2-4)	8
Ecuación (2-5)	8
Ecuación (2-6)	9
Ecuación (2-7)	9
Ecuación (2-8)	9
Ecuación (2-9)	9
Ecuación (2-10)	10
Ecuación (2-11)	10
Ecuación (2-12)	10
Ecuación (2-13)	10
Ecuación (2-14)	10
Ecuación (2-15)	10
Ecuación (2-16)	11
Ecuación (2-17)	11
Ecuación (2-18)	11
Ecuación (4-1)	29
Ecuación (4-2)	29
Ecuación (4-3)	29
Ecuación (4-4)	30
Ecuación ( 4-5)	30
Ecuación ( 4-6)	30
Ecuación ( 4-7)	30
Ecuación ( 4-8)	30



# 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un gran desarrollo en la investigación y el uso en la industria de materiales compuestos debido a la amplitud de posibilidades en mejora de propiedades que ofrecen. En el presente capítulo se pretende hacer una breve introducción al concepto de material compuesto, definiendo los distintos elementos de los que puede estar formado y sus propiedades de más interés, realizando una breve reseña histórica indicando el desarrollo que han sufrido en la industria en las últimas décadas e introduciendo la idea principal en la que se centra el presente trabajo y que ha llevado a él.

## 1.1 Contexto y motivación

### 1.1.1 Concepto de material compuesto

Un **material compuesto** se suele definir como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interface de separación entre ellos para formar un nuevo material [1]. El objetivo de esta unión es, por un lado, conformar un material cuyas propiedades no pueden ser alcanzadas por ninguno de sus constituyentes aisladamente y, por otro, aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material.

Las propiedades que suelen ser de interés en estos materiales son:

- Resistencia Mecánica
- Resistencia a corrosión
- Peso
- Aislamiento térmico
- Rigidez
- Resistencia a la abrasión
- Vida a fatiga
- Aislamiento acústico

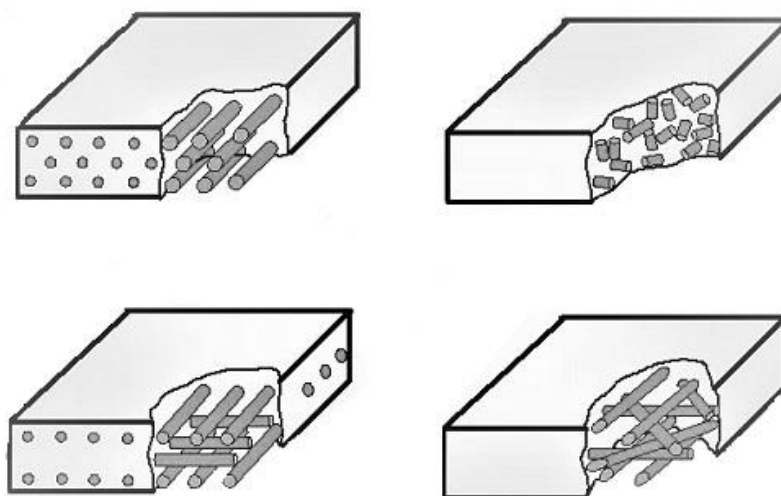


Figura 1-1. Morfología de material compuesto reforzado con fibras continuas-discontinuas en diferentes orientaciones.

Según los materiales empleados y la geometría del refuerzo que se introduce en la matriz se potenciarán unas características u otras. Los materiales compuestos pueden estar reforzados con fibras o con partículas. Estos últimos están más extendidos en la industria debido a sus excelentes propiedades mecánicas. En ellos las fibras actúan absorbiendo la mayor parte de la carga mientras que la matriz tiene la función de dar cohesión al material y aglutinar las fibras, transmitiendo las tensiones entre ellas. Las fibras presentan morfologías muy variadas con diferentes orientaciones características, tal y como presentan los ejemplos de la Figura 1-1. En función de la disposición de las fibras dentro de la matriz se aprecia un aumento de la resistencia en una dirección u otra.

A la hora de seleccionar y diseñar materiales compuestos reforzados con fibras, se deben de tener en cuenta una serie de factores:

- **Relación de aspecto:** las fibras continuas, que proporcionan mayor resistencia, son a menudo difíciles de introducir en el material y producir el mismo, mientras que las discontinuas son más fáciles, tienen una mayor relación de aspecto, produciendo también alta resistencia.
- **Fracción volumétrica de fibra:** una mayor fracción volumétrica de fibras aumenta la resistencia.
- **Orientación de la fibra:** las fibras unidireccionales presentan resistencia máxima cuando la carga aplicada es paralela a las fibras, sin embargo, las propiedades son muy anisotrópicas. Por ello, se suelen usar fibras dispuestas en forma de tejido, capas cruzadas, sacrificando la máxima resistencia con propiedades uniformes en el compuesto.
- **Propiedades de las matrices:** la matriz debe ser resistente con el fin de contribuir a la resistencia total del compuesto. La temperatura de trabajo del compuesto viene limitada por la de la matriz.
- **Propiedades de las fibras.**

### 1.1.2 Breve reseña histórica

Dentro de los materiales reforzados con fibra, en el presente trabajo se procederá a analizar y ensayar laminados de fibra carbono con matriz epoxi. Este material tiene muy buenas propiedades como una alta rigidez y un bajo peso, aunque un precio elevado debido a su coste de fabricación y puesta en servicio, lo que limita su uso a industrias como la aeronáutica y espacial, donde una pequeña reducción de peso supone un gran ahorro de combustible durante toda la vida útil.

En esta industria encontramos un importante ejemplo del auge sufrido por los materiales compuestos en las últimas décadas, particularmente en los aviones de pasajeros en la que las aleaciones de aluminio se han visto sustituidas en gran medida por materiales compuestos con un rápido desarrollo, tal y como se aprecia en la Figura 1-2.

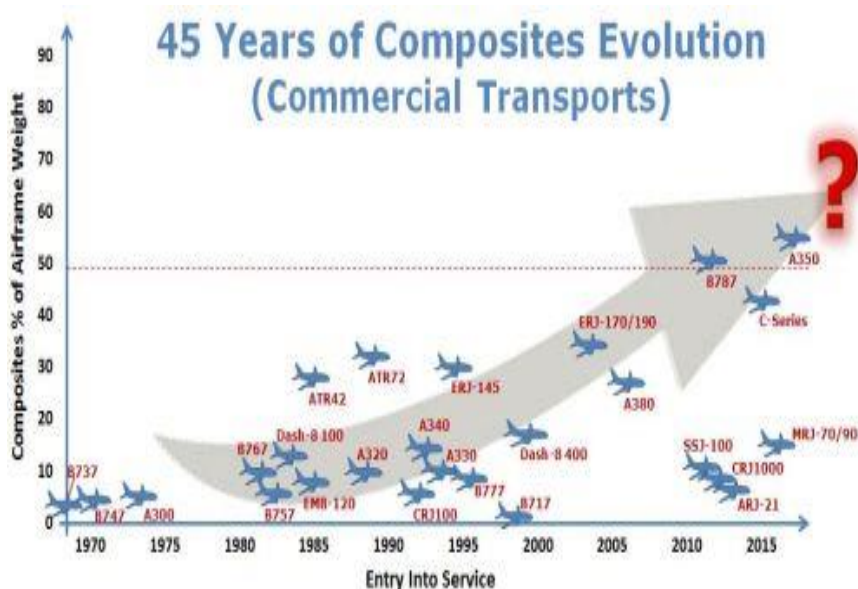


Figura 1-2. Evolución de los materiales compuestos en aviación comercial en los últimos 45 años.



En un primer momento, debido a la falta de conocimiento sobre estos materiales, su uso estaba restringido a elementos internos y no estructurales. Los primeros usos en elementos estructurales, aunque de baja responsabilidad, datan de la década de 1950, donde llegaron a alcanzar apenas el 2% del peso estructural total. En las siguientes décadas se produjo un aumento lento pero continuo del uso de materiales compuestos, pero siempre un crecimiento muy limitado por las restrictivas normas de seguridad de la aviación comercial, mientras que en la aviación militar se empezó a usar en cantidades significativas.

Durante las décadas de los 80 y los 90, los dos mayores fabricantes de aviones, Airbus y Boeing, siguieron dos estrategias diferentes con respecto al uso de materiales compuestos. Mientras que Airbus optó por aumentar continuamente el peso estructural de materiales compuestos en cada uno de sus modelos, Boeing fue mucho más lento, prácticamente manteniendo el peso estructural de material compuesto en sus modelos durante estas décadas. Sin embargo, a principios del siglo Boeing lanzó el prototipo del modelo B787 con más del 50% del peso estructural formado por materiales compuestos, muy por delante del 20% que representan en el las aleaciones de aluminio. Esto ha representado un gran salto para la industria aeronáutica, y, en particular, para Boeing dada su estrategia de décadas anteriores. Simultáneamente al desarrollo del B787 Airbus lanzó el prototipo del A350, un avión de tipo similar al B787, lo cual demuestra que en la actualidad los materiales compuestos están abocados a ocupar la mayor parte de la aeronave, incluidos los elementos estructurales primarios. En la Figura 1-3 se muestra un esquema del peso de materiales compuestos en el B787 y A320.

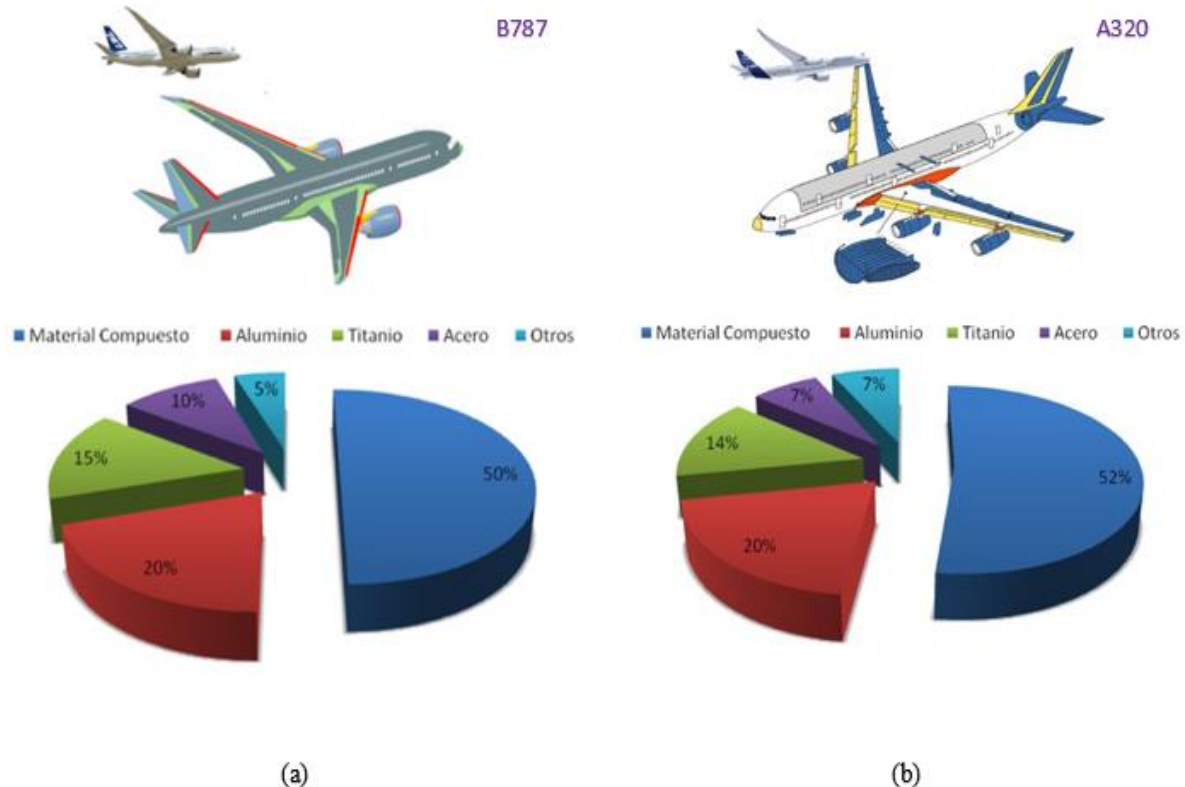


Figura 1-3. Esquema de la fracción volumétrica de peso de la estructura del B787 (a); Esquema de la fracción volumétrica de peso de la estructura del A320(b).

A pesar de las buenas propiedades observadas en los materiales compuestos hay que dejar patente que estos presentan también una serie de inconvenientes, sobre todo en cuanto a su fabricación y control, ya que la inversión en instalaciones y equipos, tanto para su almacenamiento como para su fabricación y control son muy costosos. Además, se pueden producir variaciones en sus propiedades según las circunstancias: rigidez, resistencia mecánica, baja resistencia al impacto...y producirse defectos como delaminaciones, inclusiones de partícula o daños de fibras que pueden poner en peligro la estructura y que hay que detectar a tiempo, lo que trae consigo revisiones mediante ensayos no destructivos como pueden ser los rayos X o ultrasonidos que son muy costosos.

### 1.1.3 Motivación

Una de las líneas de investigación más importantes del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM), perteneciente al Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Sevilla se centran en el estudio de materiales compuestos reforzados con fibra, dada la importancia y auge del uso de estos materiales en aplicaciones ingenieriles experimentado durante los últimos años.

Con el desarrollo de estos materiales surge la necesidad de establecer unas leyes que permitan determinar su comportamiento y en qué momento se va a producir su fallo del material. Aunque se ha avanzado mucho, desde criterios basados en el comportamiento de materiales metálicos a criterios más complejos que tienen en cuenta el fallo de cada uno de sus componentes, tanto matriz como fibra, todavía no se ha llegado a una ley definitiva, por lo que sigue siendo una línea de investigación abierta en la que se enmarca el presente trabajo. La dificultad de la predicción del fallo en estos materiales tiene distintas causas: la heterogeneidad y anisotropía de sus componentes, el número de láminas que pueden formar un laminado, las diferentes orientaciones que se pueden dar a las láminas o las distintas secuencias de apilado, la posible delaminación del material, etc. La alta complejidad de los mecanismos de fallo que terminan con el fracaso total de estos materiales están asociados, por tanto, a la microestructura a diferentes escalas e incluso a la interacción entre ellas.

Como ya se ha comentado, en la industria tiene especial importancia la disminución de peso, luego será vital encontrar leyes que permitan obtener una relación entre resistencia y espesor del laminado. En particular, el presente trabajo se centrará en el análisis de cómo se genera la evolución del daño a distintas escalas para dos laminados con secuencias similares de apilado que se diferencian únicamente en el número de láminas transversales.

## 1.2 Objetivo del proyecto

El objetivo del presente proyecto es ahondar en el llamado efecto a escala. Este efecto se refiere al aparente cambio de resistencia que se observa en láminas de material compuesto asociado, entre otros factores, al espesor de la propia lámina, así como a la orientación de las láminas adyacentes. En este trabajo se pretende estudiar este efecto desde el punto de vista del fallo transversal a tracción, es decir, aquél que se produce en laminados unidireccionales en las láminas situadas a  $90^\circ$  ante carga de tracción. Para ello se fabricarán dos laminados *cross ply* formados únicamente por láminas a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  con respecto a la dirección de aplicación de la carga, en la que se variará únicamente el espesor de sus láminas a  $90^\circ$ ; se prepararán las probetas, se ensayarán, se observarán al microscopio y se analizarán resultados, intentando encontrar diferencias a nivel micromecánico que den una explicación del efecto escala observado a nivel macromecánico.

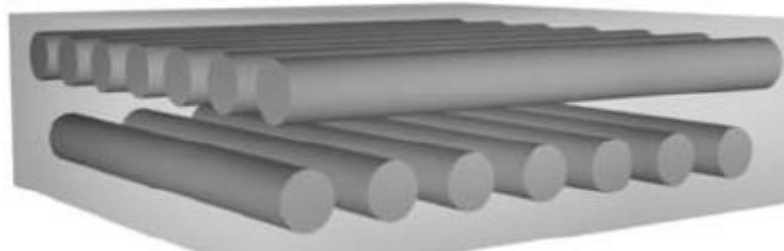


Figura 1-4. . “Cross-ply” con fibras orientadas a  $0^\circ$  (superior) y  $90^\circ$ .

En materiales anisótropos establecer una relación entre resistencia y espesor no es tan sencillo, como en materiales isotrópicos, pues entran en juego en este caso múltiples factores: heterogeneidad y anisotropía de sus componentes, número de láminas que pueden formar un laminado, distintas orientaciones posibles y secuencias de apilado. Por ello, el primer paso a seguir será la determinación experimental de la carga de rotura de cada laminado.

Una vez calculada esta, se ensayarán una serie de probetas de cada laminado a un nivel de carga menor a la tensión de rotura experimental previamente calculada. Se cortarán, se encapsularán y serán sometidas a la observación al microscopio a distintos aumentos. La comparación del daño sufrido por ambos laminados se llevará a cabo a niveles macro, meso y micro, intentando identificar diferencias a distintos niveles de carga que ayuden a justificar el comportamiento mecánico de cada uno de ellos.



## 2 ESTRUCTURA DEL TRABAJO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

Tal y como ya se ha introducido, el presente trabajo se centra en el estudio y comparación de la resistencia y los modos de fallo que aparecen en dos laminados con una secuencia de apilado similar pero que se diferencian en el número de láminas de su sección central, objeto del análisis a realizar.

En este capítulo se pretende hacer una introducción al lector de la estructura seguida en el trabajo y de los tipos de fallos que van a ser objeto de estudio.

Para comenzar la exposición del trabajo realizado, en el capítulo 3 se recogen los materiales, propiedades, dimensiones y procesos seguidos para obtención de las probetas, y, a continuación, en el capítulo 4 se exponen los ensayos a los que estas han sido sometidas. Estos ensayos han tenido una doble función: a) determinar la carga de rotura experimental de cada uno de los laminados y b) introducir un determinado daño en las probetas que será objeto de análisis en posteriores capítulos. Establecida la resistencia del material se han ensayado una serie de probetas de cada panel al 30%, 40%, 60%, 50%, 70%, 80% y 90% de su propia carga de rotura, comparándose en adelante los resultados obtenidos para cada panel según el porcentaje de la carga de rotura. Inicialmente se ensayaron una serie de probetas de cada panel al 50% y al 80% de su propia carga de rotura experimental y, según los resultados observados, se eligieron el resto de porcentajes.

Para el análisis del daño sufrido a cada uno de los niveles de carga se ha de proceder a la observación al microscopio. En el capítulo 5 aparece descrita la preparación de las muestras para llevar a cabo este proceso y en los capítulos 6, 7 y 8 los resultados de dicho análisis.

El estudio se ha separado en dos capítulos que se corresponden con la división en dos escalas de observación. La primera de ellas, recogida en el capítulo 6 y denominado como meso, muestra el daño a nivel de macrogrieta. La segunda de ellas, recogida en el capítulo 7 y denominada como micro, muestra el daño a nivel de matriz-fibra.

En el capítulo 6 se ha hecho un análisis estadístico del número de grietas transversales que aparecen por unidad de longitud y una clasificación de estas según determinadas características encontradas que diferencian unas de otras. En el análisis de la relación entre la densidad de grietas y resistencia de cada panel se ha calculado la tensión que aguanta cada lámina a 90° para cada nivel de carga. Se ha partido para ello tanto de datos experimentales (carga aplicada), como datos nominales del material y leyes teóricas, pues para la obtención de estos resultados se ha empleado la Teoría General del Laminado.

La Teoría General de Laminados consiste en encontrar relación entre esfuerzos y deformaciones usando las hipótesis generales de las placas delgadas (hipótesis de Kirchhoff) [1]. La ecuación de comportamiento para una lámina que ocupa la posición k dentro del laminado aparece en la ecuación 2-1.

$$\underline{\sigma}^k = \underline{\bar{Q}}^k \underline{\varepsilon}^k \quad (2-1)$$

Suponiendo que la adhesión entre las láminas es perfecta (desplazamientos continuos entre láminas), las hipótesis de Kirchhoff establecen que una línea perpendicular a la superficie media, permanece perpendicular a la superficie media deformada, sin acortarse ni alargarse. Lo que implica:

$$\varepsilon_z = 0 \quad (2-2)$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (2-3)$$

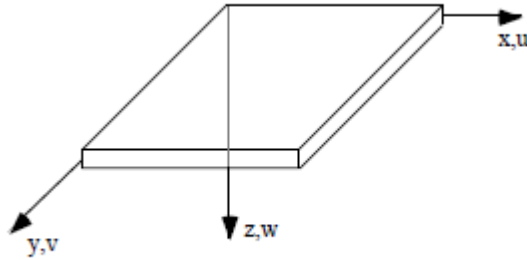


Figura 2-1. Ejes de referencia.

Las deformaciones no nulas expresadas en forma vectorial en función de un punto genérico de coordenada  $z$ , quedan tal y como se aprecia 2-4:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Los términos  $\varepsilon_x^0$ ,  $\varepsilon_y^0$  y  $\varepsilon_{xy}^0$  representan las deformaciones como laja en el punto del plano medio, es decir, muestran los alargamientos unitarios y las distorsiones que se producen y por otro lado  $k_x^0$ ,  $k_y^0$ ,  $k_{xy}^0$  representan las deformaciones que se producen como placa, es decir, muestran curvaturas de flexión y torsión. La ley de comportamiento de la lámina  $k$  quedaría:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Donde  $Q_{ij}$  puede ser diferente para cada lámina, sólo queda garantizada la continuidad en deformaciones pero no en tensiones. Introduciendo el concepto de esfuerzos interno como la resultante de tensiones, en forma idéntica al de placas isotrópicas, éstos se definen como:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k dz \quad (2-6)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k z dz \quad (2-7)$$

Con la configuración de láminas indicada en la Figura 2-2.

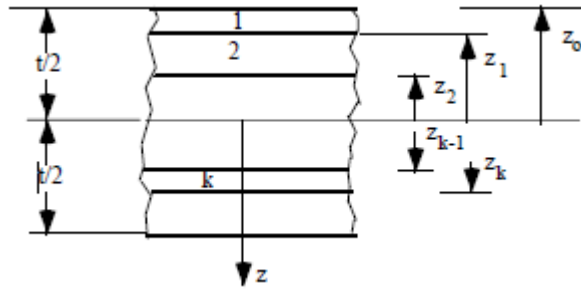


Figura 2-2. Configuración de láminas.

En la Ecuación 2-6 y 2-7 se ha supuesto que  $Q_{ij}$  es independiente de  $z$  dentro de cada lámina, lo que es cierto a menos que la lámina tenga propiedades dependientes de la temperatura y exista un gradiente de temperatura en la lámina.

Dado que tanto las deformaciones de laja como las plazas son independientes de  $z$  (son valores asociados al plano medio) se pueden definir los esfuerzos internos como:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Donde se definen las ecuaciones:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij}^k (z_k - z_{k-1}) \quad (2-9)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij}^k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2-10)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2-11)$$

La presencia de  $B_{ij}$  implica acoplamiento entre los efectos de laja y de placa, lo que puede en algunos casos producir configuraciones deformadas, aparentemente no previstas (solicitar  $N_x$  y aparecer deformaciones de placas).

Lo expuesto hasta ahora es útil cuando la temperatura de funcionamiento se corresponde con la temperatura de curado. En los cálculos realizados en el presente documento se ha tenido en cuenta el efecto de la temperatura de curado, por lo se han de introducir una serie de cambios en las ecuaciones. Las deformadas totales se ponen en la forma:

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j + \alpha_i\Delta T \quad i,j=1,2,\dots,6 \quad (2-12)$$

Donde  $\alpha_i=0$  para  $i>3$ . La relación inversa queda:

$$\sigma_i = C_{ij}(\varepsilon_j - \alpha_j\Delta T) \quad i,j=1,2,\dots,6 \quad (2-13)$$

Quedando, la ley de comportamiento termoelástica en ejes no principales como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_x\Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha_y\Delta T \\ \gamma_{xy} - \alpha_{xy}\Delta T \end{bmatrix}^k \quad (2-14)$$

Donde  $\Delta T$ = Temperatura de carga- Temperatura de curado. Introduciendo la ley de comportamiento en la expression de esfuerzos se obtiene:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (2-15)$$



Donde  $A_{ij}$  y  $B_{ij}$  tendrían el mismo significado que anteriormente, y :

$$\begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}^k \Delta T dz \quad (2-16)$$

Y análogamente para los momentos:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Donde  $D_{ij}$  tendría el mismo significado que anteriormente, y:

$$\begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}^k \Delta T z dz \quad (2-18)$$

Una vez analizadas las características de resistencia del laminado y su relación con el daño que aparece a escala meso se realiza un análisis detallado de el daño a escala micro.

En el capítulo 7 se ha hecho una revisión completa de lo observado en las muestras al recorrerlas a un alto número de aumentos. Se pretende ahora hacer una introducción al lector de como se producen normalmente el mecanismo de fallo de un material compuesto y de los defectos más comunes que se observan, con el objetivo de tener una idea general de los tipos de daño que se van a encontrar en las muestras bajo análisis y su relación con la resistencia del laminado.

Como se ha comentado en el capítulo introductorio, la anisotropía de los materiales compuestos origina que sea muy difícil la determinación de criterios de fallos absolutos, pero la importancia adquirida por este tipo de materiales en los últimos años ha provocado numerosos estudios sobre como se dan en estos materiales la generación y propagación de grietas de interfase. Estudios numéricos, tanto sobre láminas aisladas (como el desarrollado en el departamento de Elasticidad y Resistencia de materiales de la Universidad de Sevilla, *Kinking of Transversal Interface Cracks Between Fiber and Matrix* [2]), como en laminados completos (como el estudio expuesto en el artículo *Microscopic failure mechanisms of fiber-reinforced polymer composites under transverse tension and compression* [3]) se inclinan a que los mecanismo de fallo implicados en el agrietamiento de las láminas de forma transversal a la aplicación de la carga son principalmente la deformación plástica de la matriz y la separación interfacial.

En el caso ideal, estos estudios predicen que las grietas transversales se forman en varias etapas, según lo indicado en la Figura 2-3. De acuerdo a esto, la nucleación del daño se produce en la interfase entre la fibra y la matriz, en la región en la que la tensión normal es máxima (a), generándose un despegue que se propaga por la interfase (b). En este momento, la grieta de interfase experimenta un cambio brusco en su dirección y penetra en la matriz, desarrollándose perpendicularmente a la dirección de la carga (c). Finalmente, las grietas así

generadas se encuentran con otras análogas y se unen para formar macrogrietas transversales. Para referir cada una de las etapas de crecimiento se emplea la nomenclatura Fase I, Fase II y Fase II respectivamente. En el análisis de micrografías se hará un estudio de la aparición de cada una de las fases en las muestras.

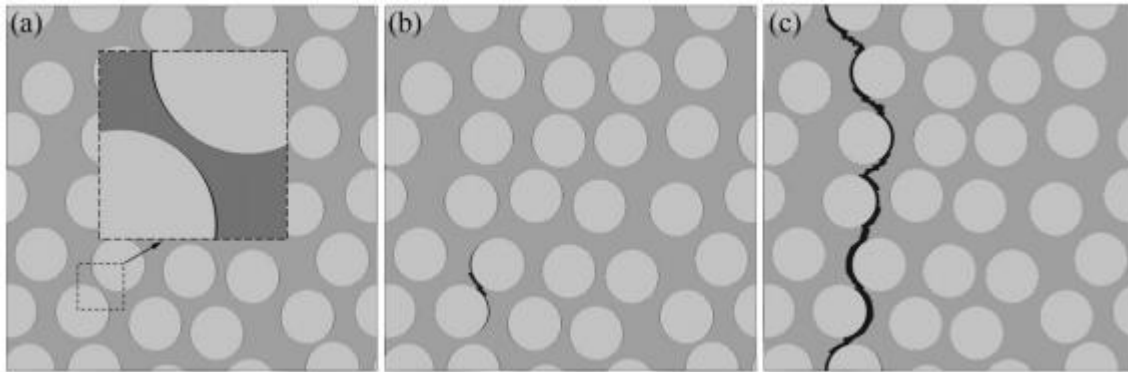


Figura 2-3. Iniciación y propagación de una grieta transversal bajo la aplicación de cargas normales según análisis numéricos [3].

Otros tipo de daño que se contabilizará a esta escala serán las delaminaciones. Tal y como el estudio del comportamiento del resto de materiales compuestos la caracterización de los mecanismos de fallo en laminados “*cross ply*” es todavía un tema abierto. Hay estudios que establecen como uno de los segundos modos de fallo, tras la aparición el primer modo de fallo en un laminado de láminas orientas a  $90^\circ$  respecto a la dirección de aplicación de la carga que son las grietas transversales en estas láminas, las delaminaciones. Una revisión completa del estado del arte del problema de la delaminación fue hecho por Garg, donde se discuten sus principales causas entre las que destaca la fisuración transversal. Cuando estas grietas alcanzan la interfaz con la capa vecina, que en los laminados bajo estudio está a  $0^\circ$ , pueden ocasionar la bifurcación de la grieta que se desarrollará ahora como una grieta de delaminación entre las dos capas (la de las láminas a  $0^\circ$  y las láminas a  $90^\circ$ ) [8], tal y como se muestra en la Figura 2-4.

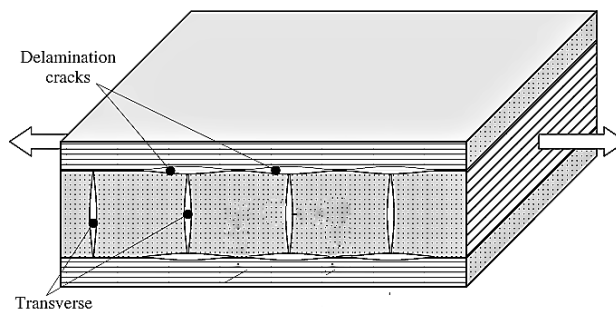


Figura 2-4. Representación gráfica de una delaminación de un laminado  $[0,90]_S$ .

El análisis de este tipo de daño y la comparación entre los dos paneles traerá consigo el estudio de cuál es la tendencia general que siguen las macrogrietas cuando llegan a la lámina de  $0^\circ$ .

Se introducirá también en el análisis de micrografías una sección donde se exponen defectos del material, como láminas no orientadas perfectamente o poros, que han podido afectar de alguna manera a la resistencia del laminado y alejan al laminado de un comportamiento perfectamente “ideal”.

Por último, y tras una serie de observaciones realizadas entre varias probetas ensayadas al mismo nivel de carga, se introduce en el capítulo 8 un breve estudio de los posibles efectos que haya podido tener el proceso de lijado y pulido llevado a cabo en la preparación de muestras para la observación al microscopio.



# 3 FABRICACIÓN DE PROBETAS

El primer paso para cumplir con los objetivos de este proyecto ha sido la fabricación de las probetas a ensayar y analizar. En el presente apartado se describirán tanto el diseño de las probetas como los materiales y equipos empleados en las distintas etapas del proceso de fabricación. Todo el proceso de fabricación ha sido llevado a cabo en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

## 3.1 Diseño de probetas

Como se ha comentado en la sección 1.2, el objetivo del presente trabajo es analizar el efecto a escala desde el punto de vista del fallo transversal a tracción, es decir, aquél que se en las láminas situadas a  $90^\circ$  respecto a la dirección de aplicación de la carga. Para ello se han fabricado dos laminados *cross ply*, es decir, formados únicamente por laminas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , diferenciados únicamente en el espesor de sus capas centrales que al ser el objeto de estudio estarán a  $90^\circ$ , tal y como se ha comentando. Además, estos laminados cuentan, a modo de refuerzo, con dos láminas a  $0^\circ$  en cada lado exterior, de tal modo que las secuencias de apilado son:

Panel A:  $[0_2/90_2]_s$

Panel B:  $[0_2/90_4]_s$

Ambos paneles se realizaron con unas dimensiones de  $300\text{mm} \times 500\text{mm}$ , lo cual permitió obtener de cada laminado 29 probetas de dimensiones  $15\text{mm} \times 155\text{mm}$ . La Figura 3-1 presenta un esquema de las dimensiones de los laminados realizados para la obtención de las probetas.

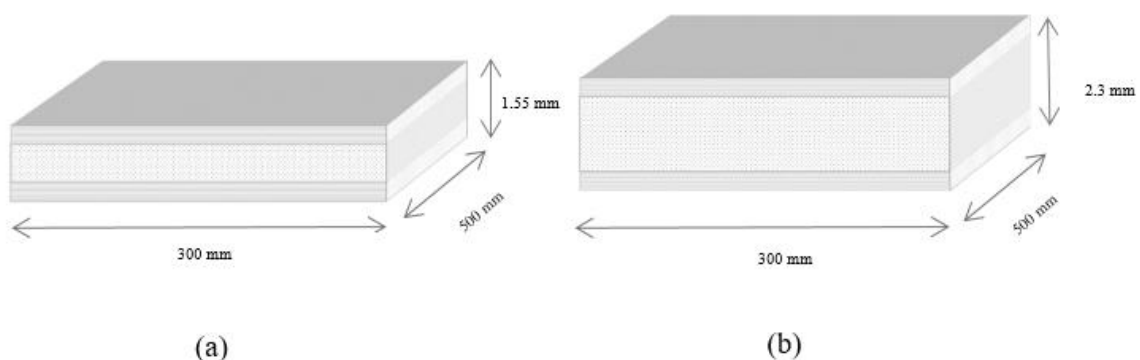


Figura 3-1. Esquema de las dimensiones de los laminados objeto de estudio en el presente trabajo.

Las dimensiones de las probetas se han establecido según la norma UNE-EN 2561 [5]. Para llegar a estas dimensiones y al número de probetas finalmente obtenidas se han de tener en cuenta las dimensiones iniciales, la pérdida de material sufrida durante la fabricación de las probetas en procesos como el resanado y el corte, así como el hecho de que la dimensión dada posteriormente de longitud de la probeta se refiere a la longitud entre tacos.

Estos últimos han de ser introducidos con el fin de realizar un ensayo de tracción correcto y controlado. Los tacos mejoran la adherencia entre la probeta y las mordazas de la máquina de tracción y evitan que el fallo se produzca en una zona indeseable.

## 3.2 Materiales empleados

A continuación, se describen los materiales usados tanto para la fabricación de las probetas a analizar, como para la fabricación y adhesión de los tacos necesarios para la realización del ensayo.

### 3.2.1 Material compuesto en las probetas

Las láminas de material compuesto empleadas en la fabricación de los paneles anteriormente descritos se han obtenido de un rollo de pre-preg compuesto por fibras de carbono preimpregnadas con una matriz epoxy. La designación de este material es *AS4/8552/RC34 AW 194/300 mm (Z-19775)*, donde AS4 hace referencia al tipo de fibra y 8552 al tipo de resina epoxy. En la tabla siguiente se exponen los valores nominales de las propiedades específicas de este material sacadas de la norma remitida por el fabricante, IPS05-01-001-03 [6].

Propiedad	Método de testado	Unidades	Valor Nominal
Densidad de resina	ISO 1183-1 Method A	g/cm <sup>3</sup>	1.3
Densidad de fibra	ISO 10119	g/cm <sup>3</sup>	1.785
Fracción volumétrica de fibra	EN2564	%	59
Densidad de láminas	-	g/cm <sup>3</sup>	1.59

Tabla 3-1. Valor nominal de las propiedades específicas del material *AS4/8552*

El rollo de material debe permanecer en una cámara frigorífica a una temperatura entre  $-18^{\circ}\text{C}$  y  $-20^{\circ}\text{C}$  introducido en una bolsa frigorífica cuando no se esté utilizando para evitar así la degradación de la resina. Esto hace necesario una espera de unos 30 minutos para que se atempere antes de su uso.

### 3.2.2 Material compuesto en los tacos

Para la realización de los tacos se ha empleado un material compuesto de fibra de vidrio-epoxy ya curado, en el que la fibra está orientada a  $45^{\circ}$ .

La dimensión de los tacos, al igual que la de los laminados, se ha elegido para que las dimensiones finales de la probeta estén de acuerdo con lo estipulado en la norma IPS05-01-001-03 [6]. En la Figura 3-2 aparecen las especificaciones recogidas en esta norma.

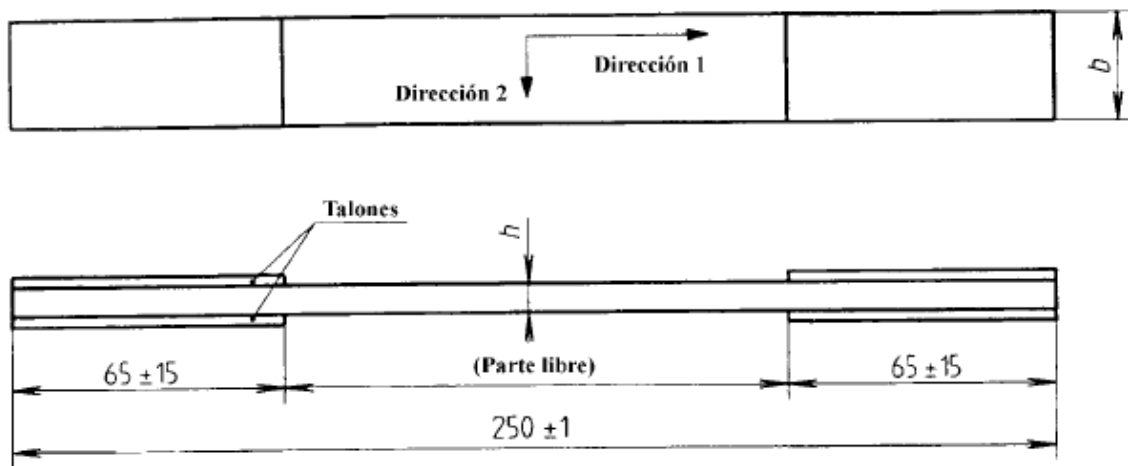


Figura 3-2. Dimesiones de las probetas a ensayar según lo estipulado en la norma IPS05-01-001-03 [6].

Para la adhesión de los tacos a los paneles de carbon-epoxy se ha usado una película de adhesivo estructural *3M™ Scotch – Weld™ AF 163 – 2k*. El adhesivo se conserva también a baja temperatura por lo que, antes de usarlo, habrá que dejar que se atempere durante 1 hora.

### 3.3 Proceso de fabricación

En el presente apartado se describe el proceso seguido para la obtención de las probetas que han sido objeto de estudio en el presente trabajo. Este se divide en las siguientes etapas:

- Corte del material
- Apilado de las láminas
- Fabricación de la bolsa de vacío para compactar las láminas
- Curado en autoclave de los laminados
- Resanado de los paneles
- Preparación de los tacos de vidrio
- Corte de las probetas
- Trazabilidad de las probetas obtenidas.

Para evitar la contaminación del material durante la fabricación, así como un deterioro de sus propiedades, las tres primeras etapas se han llevado a cabo en lo que se conoce como sala limpia, es decir, una sala con condiciones de humedad, temperatura y presión controladas con el objetivo de evitar el deterioro de la resina.

#### 3.3.1 Corte del material

La primera etapa necesaria para la fabricación de las probetas es el corte de las láminas requeridas para conformar el laminado deseado con las distintas orientaciones.

Tal y como se ha expuesto anteriormente, en el presente proyecto se han fabricado dos laminados de dimensiones  $300\text{mm} \times 500\text{mm}$ . Por lo tanto, ha sido necesario cortar 24 láminas de  $150\text{mm}$  (ancho del rollo empleado) por  $500\text{mm}$  para formar las láminas centrales de a  $90^\circ$ . Para formar las láminas a  $0^\circ$  se han cortado 27 láminas de  $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ , tres de las cuales se han vuelto a cortar para obtener láminas de  $50\text{mm} \times 300\text{mm}$ , de tal forma que se obtiene material suficiente para la secuencia de apilado de ambos laminados, tal y como aparece en la Figura 3-3.



Figura 3-3 . Láminas cortadas con las orientaciones requeridas.

Para realizar el corte se ha empleado un cúter. A la hora de establecer la dirección de corte se usó de ayuda escuadra y cartabón para que los ángulos de corte quedasen coincidentes con los ángulos de la fibra. Los instrumentos empleados aparecen en la Figura 3-4.



Figura 3-4. Cúter, escuadra y cartabón empleados en el corte de láminas de material.

### 3.3.2 Apilado de las láminas

Una vez cortadas todas las láminas de material necesarias se ha procedido al apilado de las mismas para conformar cada uno de los paneles con su correspondiente secuencia de apilado. Este proceso se ha llevado a cabo de manera manual, ejerciendo presión sobre las láminas mediante un útil o espátula de Nylon. Para apilar se ha colocado la primera lámina con el papel protector que trae el pre-preg de fábrica sobre una superficie plana, previamente limpiada con acetona para evitar que entren en contacto con el material restos de polvo o de material sobrante del trabajo previo. A continuación, se han ido colocando el resto quitando este papel de forma que se han ido adheriendo unas a otras. No ha sido necesario aplicar ningún adhesivo adicional.



Figura 3-5. Espátula de Nylon usada en el apilado



### 3.3.3 Fabricación de la bolsa de vacío

Para aplicar el ciclo de curado que permite obtener paneles totalmente compactos se introducen los laminados en una bolsa de vacío. Esta bolsa tiene una triple función: evitar la inclusión de aire entre las distintas láminas, evitar la contaminación de los laminados mediante partículas de polvo, suciedad o humedad y proteger el material del aire caliente que recibirá en el autoclave y que permite que la resina fluya uniformemente, de forma que esta no se queme.

Los materiales necesarios para fabricar una bolsa de vacío son, tal y como se recoge en la Figura 3-6:

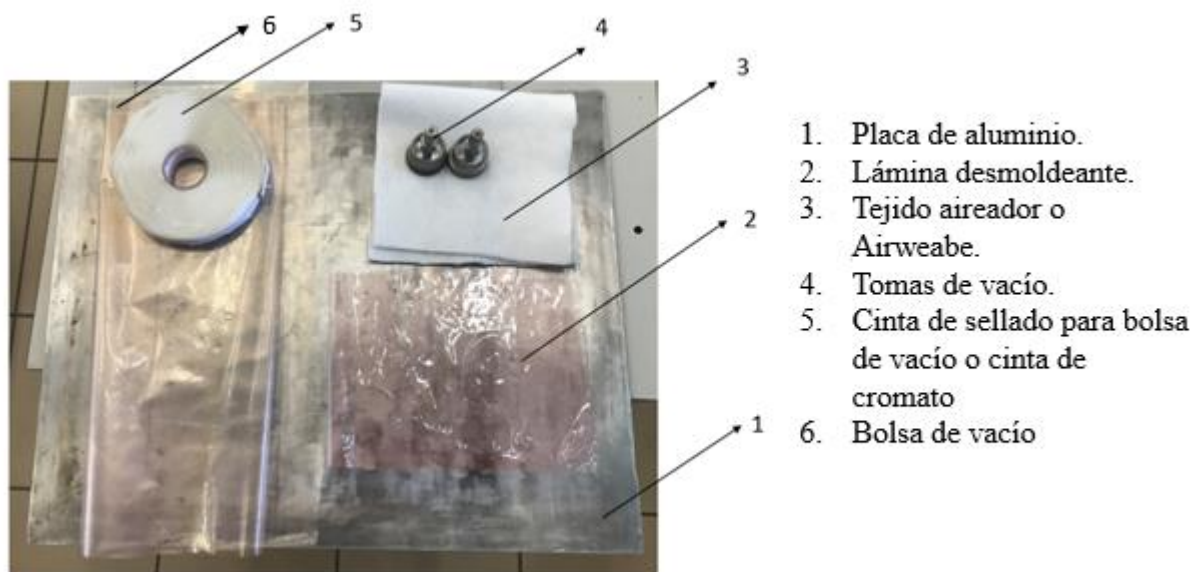


Figura 3-6. Elementos de una bolsa de vacío.

En la realización de la bolsa de vacío se han seguido los siguientes pasos:

- Colocación de una plancha de aluminio sobre una superficie plana. Esta plancha ha de ser recubierta con una capa de teflón.
- Se retiran los papeles protectores externos del material anteriormente apilado y se coloca este sobre el teflón, dejando márgenes y espacio suficiente para colocar las tomas de vacío, así como un cordón de corcho alrededor de cada lámina que evite que la resina escape durante el curado.
- Colocar el retenedor de corcho.
- Recubrir el conjunto con una capa de *airweave* (tejido esponjoso que previene pinchazos en la bolsa de vacío y los consiguientes escapes) y la bolsa de vacío. Bajo la bolsa se colocan las tomas de vacío.
- Adherir la capa exterior de la bolsa a la placa metálica para evitar que entre aire en la bolsa una vez realizado el vacío. Se moldea el cromato de manera que todas las posibles vías de entrada de aire queden cerradas.

Una vez hecho esto queda conformada la bolsa de vacío, por lo que queda colocar las partes superiores de las tomas y activar el compresor para realizar el vacío. Al realizar el vacío se ha realizado la comprobación de que no existiera en la bolsa ningún tipo de escape de aire con el fin de que el proceso se ejecute adecuadamente.

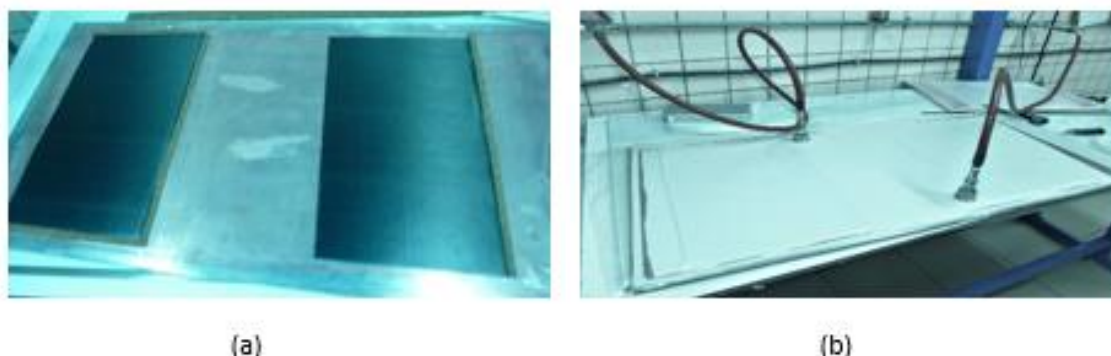


Figura 3-7. Paneles fabricados con el cromato sobre la placa de aluminio (a); Proceso de realización de vacío sobre la bolsa de vacío.

### 3.3.4 Curado en autoclave

El siguiente paso a realizar fue introducir la bolsa de vacío en el autoclave para el curado de los laminados. Se define el curado como el proceso de secado o polimerización de la matriz para formar los enlaces permanentes entre la matriz y las fibras en una lámina y a su vez entre las propias láminas [1]. Aunque existen distintos métodos para realizar el curado el método más extendido en los materiales pre-preg es el método de bolsa de vacío, presión o autoclave. Este es una máquina industrial que cuenta con los siguientes componentes:

- Cámara presurizada: Vasija donde se introducen los componentes a curar.
- Dispositivos de calentamiento: Son los encargados de conseguir las distintas temperaturas de curado para cada tipo de material introducido.
- Sistema de aplicación de vacío: Fundamental en la fabricación de un laminado de material compuesto. Se conecta la bolsa de vacío anteriormente configurada a las tomas de vacío.
- Sistema de control de parámetros de curado: Asegura en todo momento, mediante sistemas monotorizados, que las condiciones de presión y temperaturas son las adecuadas para el proceso.
- Soporte de los moldes para su introducción en la cámara.

El funcionamiento del autoclave se basa en la consolidación de los laminados mediante el movimiento de aire caliente en el interior de la cámara a través de una circulación forzada que permite obtener valores de temperatura en el interior del equipo con variaciones mínimas entre unos puntos y otros. El proceso de enfriamiento se consigue haciendo circular agua fría a través de un intercambiador diseñado al efecto que permite la circulación forzada de aire entre sus placas haciendo disminuir la temperatura hasta los valores deseados. El autoclave empleado en el laboratorio es el modelo *SCHOLZ BA-E44313-1*.

Antes de aplicar el ciclo de curado se ha de comprobar que no existen pérdidas de aire en la bolsa de vacío. Para ello se conectan las tomas de vacío de la bolsa a las del autoclave y se aplica vacío hasta alcanzar en la bolsa los 0.8 bar de presión. Cuando se alcancen, se corta el vacío y se espera unos minutos. Si no baja la presión dentro de la bolsa significa que el vacío se ha realizado correctamente y no tiene pérdidas. Una vez comprobado este hecho se procede a introducir la bolsa en el autoclave y a someter los paneles al ciclo de curado.

El **ciclo de curado** viene dado por el fabricante del material. En el caso del pre-preg usado se dan a grandes rasgos tres etapas diferenciadas: rampa de subida de temperatura y presión, tramo horizontal donde los valores se mantienen constantes y por último tramo de enfriamiento y despresurización. La evolución de cada una de las variables en el interior del autoclave es la siguiente:

- **Temperatura del aire:** En primer lugar se aprecia un ascenso desde la temperatura ambiente hasta una temperatura de 180°C, donde se mantiene durante aproximadamente 3 horas. Finalmente se produce el enfriamiento del aire. Esta evolución se ve en el Gráfico 3-1.

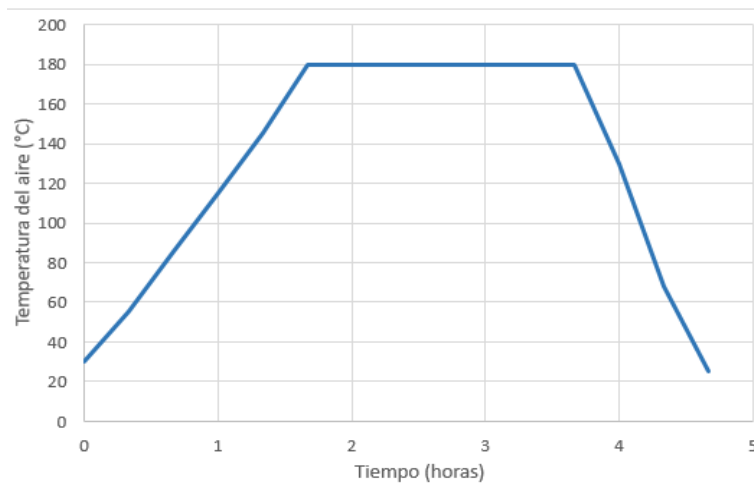


Gráfico 3-1. Evolución de la temperatura del aire en el autoclave.

- **Presión:** Se alcanza una presión máxima 9 bar.

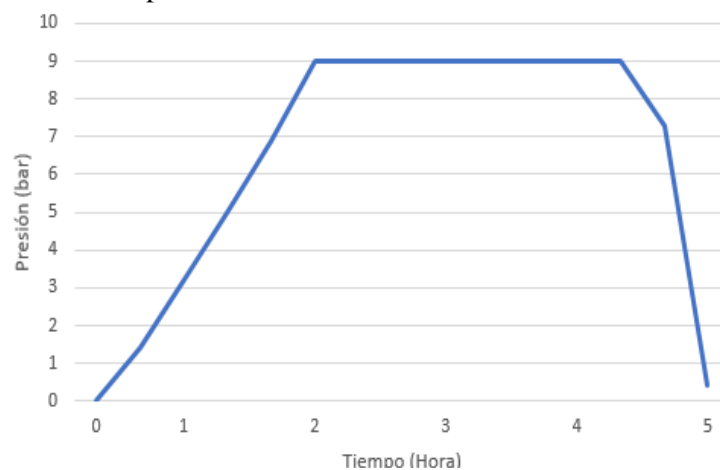


Gráfico 3-2. Evolución de la presión del aire en el autoclave

- **Vacío en la bolsa:** va de -0,8 bar hasta -0,1 bar aproximadamente.

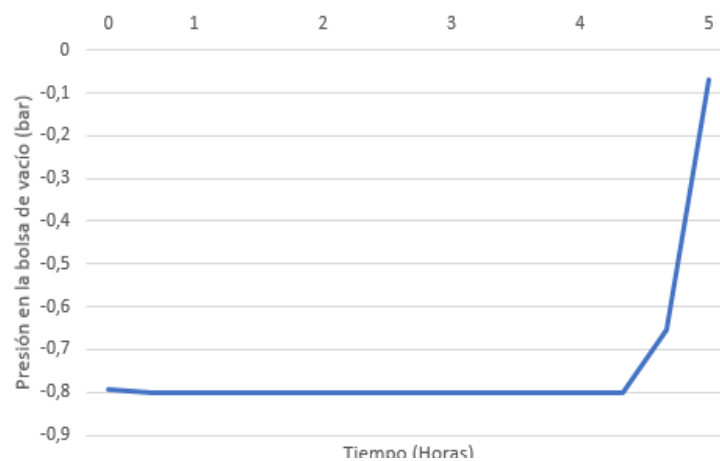


Gráfico 3-3. Evolución de la presión en la bolsa de vacío

La duración del ciclo de curado es de 4 horas 40 minutos aproximadamente.

### 3.3.5 Resanado de los paneles

Una vez se tienen los paneles curados se procede al resanado de estos. El resanado es un proceso que consiste en eliminar, por un lado, el cerco de corcho con el que se rodearon los paneles a la hora de introducirlos en la bolsa de vacío para evitar que la resina fluyera, y, por otro, cualquier posible imperfección que haya podido surgir como consecuencia del proceso de fabricación, como por ejemplo, el que no todas las laminas lleguen perfectamente a los bordes y se produzcan en estas zonas huecos de material.

Para llevar a cabo el resanado se ha usado una máquina de corte como la que se muestra en la Figura 3-8. Esta máquina de corte consta de un disco de diamante que corta mediante abrasión, siendo refrigerado en todo momento por agua, y de una bancada de movimiento manual sobre la que se coloca la pieza. Es importante tener en cuenta la dirección de las fibras en cada laminado a la hora de cortar y mantenerla. Para ello la máquina de corte consta con un apoyo que ayuda a mantener la perpendicularidad y, además, se ha hecho uso de una escuadra para encuadrar.



Figura 3-8. Máquina de corte empleada en el proceso de fabricación.

### 3.3.6 Preparación de los tacos de vidrio

Una vez obtenidos unos paneles compactos se colocaron los tacos de fibra de vidrio en los extremos. Como se ha comentado anteriormente, se ha usado un material ya curado en forma de panel. De este se han cortado 8 láminas de dimensiones  $60\text{mm} \times 500\text{mm}$ , con el objetivo de obtener una longitud libre entre taps de  $150\text{mm}$ .

A continuación, se llevó a cabo las láminas de vidrio con los dos laminados. Un aspecto muy importante a la hora de la adhesión es la limpieza de las dos superficies a unir. Para facilitar el proceso el panel de vidrio proporcionado ya viene preparado con una de sus dos caras lijadas. Se procedió de igual forma en los paneles fabricados lijando la zona de unión. Para garantizar que la limpieza fuese total y que no quedasen restos del lijado se limpiaron con agua las superficies a unir y se realizó una segunda limpieza de los tacos con acetona. Para evitar restos de humedad se introdujo el material en un horno antes de la adhesión.

Una vez seco se aplicó el adhesivo procediendo como sigue. En primer lugar, se procedió cortando trozos de adhesivo, de dimensiones ligeramente inferiores a las láminas de vidrio de tal forma que por un lado permita que el adhesivo fluya sin salirse del panel, y, por otro, se garantice que no van a existir huecos donde no haya adhesivo y, por tanto, no se produzca la unión completa. En segundo lugar, se pegó el adhesivo a la superficie lijada de los paneles y a continuación, se unieron los tacos haciendo coincidir los bordes y aplicando presión. En los bordes de unión se colocó cinta adhesiva para evitar que el adhesivo fluya fuera de los límites de los tacos. Por último, y para garantizar la unión perfecta se procedió al curado del adhesivo. Para ello, se fabricó una nueva bolsa de vacío en la cual se introdujeron los paneles, ya con los talones de vidrio, y de ahí al autoclave.

En la Figura 7-9(a) aparecen los laminados tras haberse unido a los tacos de vidrio y en la 7-9(b) en el interior de la bolsa de vacío.

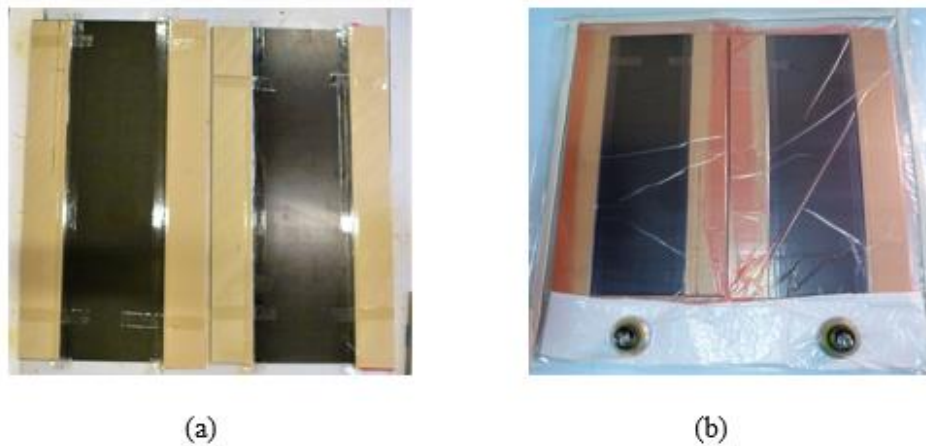


Figura 3-9. Láminados con los talones de vidrio aplicados a presión (a); Laminados con los talones de vidrio en la bolsa de vacío(b).

### 3.3.7 Corte de las probetas

Una vez se sacan del autoclave los laminados con los correspondientes talones de vidrio curados y en perfecta unión para realizar los ensayos, se procede a la obtención de las probetas. Para ello se ha procedido al corte de cada láminado mediante la máquina de corte anteriormente descrita. Para realizar el corte con las medidas deseadas, previamente se han marcado mediante un rotulador permanente la separación entre probetas sobre los tacos, teniendo en cuenta la pérdida de material que se produce en el corte. Para mantener la perpendicularidad durante el corte se ha hecho uso de escuadra y cartabón.

### 3.3.8 Trazabilidad de las probetas obtenidas

Una vez se han obtenido las probetas con su configuración final es vital nombrarlas mediante una designación que indique en todo momento a que laminado pertenece la probeta, y que, a su vez, la identifique dentro del propio panel. Se ha elegido nombrar al panel delgado, es decir, el que sigue la secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_S$ , con la letra A, y el panel grueso, es decir, el que sigue la secuencia  $[0_2, 90_4]_S$  con la letra B.

A la hora de identificar cada probeta dentro de su propio panel, se decidió seguir una numeración ordenada desde 1 a 29, es decir, hasta el número total de probetas de cada laminado. Para numerarlas se siguió el orden con el que contaban las probetas dentro de su laminado antes de ser cortadas. Para poder seguir esta secuencia, antes de el corte de las probetas se señaló cada panel con un dibujo que se reconstruyó una vez cortadas. En la Figura 3-10 se observan las probetas ya cortadas, etiquetadas y listas para ser ensayadas.



(a)



(b)

Figura 3-10. Conjunto de probetas obtenidas para el panel A(a); Conjunto de probetas obtenidas para el panel B (b).



# 4 ENSAYOS MECÁNICOS

Los ensayos mecánicos sirven para comprobar cuál es la respuesta que ofrecen ciertos materiales al ser manipulados. Mediante distintos esfuerzos mecánicos se fuerza al límite el material, permitiendo caracterizarlo mecánicamente. Conocer esta información es vital en la industria para destinar unos materiales a un servicio u otro.

Tradicionalmente, los ensayos mecánicos han permitido caracterizar mecánicamente materiales isótropos, sin embargo, en el análisis de materiales compuestos entra en juego las distintas propiedades que muestran en función de la dirección. Los ensayos a realizar son, en general, una continuación de los que se realizan a materiales isótropos, si bien es preciso tomar algunas precauciones que derivan de la existencia de acoplamiento entre tensiones y deformaciones normales y tangenciales. En cuanto a los criterios de resistencia, a diferencia de los materiales isótropos, no tiene sentido plantearlos en términos de tensiones o deformaciones principales, sino referidos a ejes de ortotropía de la lámina. Los cuales no tienen en general porqué coincidir con los ejes principales [1].

El presente trabajo se centra en el análisis de la resistencia y el daño sufrido por materiales sometidos a tracción en la dirección perpendicular a la fibra en la parte central del laminado, para lo cual se procede de la siguiente forma:

- Determinación de características de resistencia y rigidez del laminado en la dirección de aplicación de la carga. Para determinar estas se llevan una serie de probetas de cada panel hasta la carga de rotura.
- Análisis microscópico del daño sufrido por cada panel para distintos niveles de carga, refiriéndose nivel de carga a un porcentaje determinado de la tensión de rotura previamente calculada.
- Comparación de resultados entre cada panel.

Los ensayos a los que han sido sometidos las probetas objeto han sido realizados en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM), valiéndose por tanto de los equipos y software allí disponibles. A continuación se detallan estos, así como los distintos ensayos realizados.

## 4.1 Equipos y software

A la hora de llevar a cabo el ensayo de las probetas en el laboratorio se han usado los siguientes equipos:

- Máquina Universal de Ensayos Instron 4483 con célula de carga de 15000 kg o, en su defecto, la Máquina universal de Ensayos Instron 4482 con célula de carga de 10000 kg. Ambas máquinas se han empleado de forma intercambiable según la disponibilidad en laboratorio.



Figura 4-1. Máquina Universal de Ensayos Instron 4483 y Máquina Universal de Ensayos Instron 4482.

- Extensómetro 2630-112, de 50 mm de longitud y 25 mm de apertura máxima.

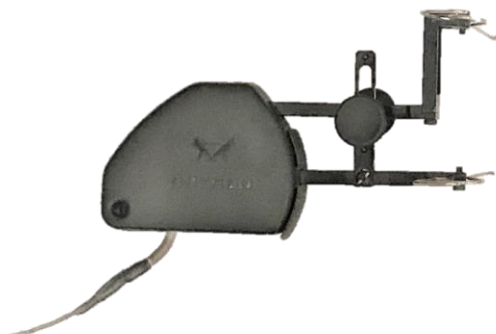


Figura 4-2. Extensómetro 2630-112.

- Ordenador provisto de tarjeta de adquisición de datos y software de Gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron, *Test Control Instron Series 44 V17-6*.

## 4.2 Procedimiento experimental

El primer paso a seguir para realizar los ensayos requeridos ha sido medir las dimensiones de las probetas. El software empleado graba datos de fuerza (N) en función de la apertura del extensómetro (mm). Para poder analizar cada probeta en términos de tensión (MPa) es de vital importancia tener correctamente caracterizada la sección, por lo que se han realizado medidas de espesor (h) y ancho (b) de cada probeta, siguiendo lo especificado en la norma UNE-EN 2561:1995 [2]. Esta norma especifica que tanto el ancho como el espesor son la media aritmética de 3 medidas: una en el centro de la probeta y dos en dos puntos opuestos a 30 mm del centro.

Otras medidas que se han tomado para obtener una información completa de la configuración inicial de la probeta son la longitud del "span", es decir, la longitud libre, y la longitud de cada taco. La suma de la longitud del "span" y de cada taco permite obtener la longitud total de la probeta. Todas las medidas realizadas se encuentran recogidas en el Anexo A del presente documento.

Para realizar las medidas se ha empleado un pie de rey tal y como el que aparece en la Figura 4-3.



Figura 4-3. Pie de rey.

Una vez determinadas las dimensiones de cada probeta estas están listas para ser ensayadas. Para ello se hizo necesaria la preparación de una de las máquinas de tracción, lo cual consta de dos pasos: asegurar que la célula de carga montada en la máquina es capaz de generar la fuerza de tracción suficiente y colocación de las mordazas. El hecho de escoger unas mordazas apropiadas es de suma importancia, ya que escoger unas mordazas con una apertura demasiado grande podría traer consigo que no cerraran sobre



la probeta correctamente y esta resbalara durante el ensayo mientras que con unas demasiado pequeñas no sería posible introducir la probeta. Se eligieron unas mordazas cuya cara interior es plana y rugosa para asegurar la sujeción de la mordaza, con una apertura máxima de 6 mm, lo cual supera la dimensión de la superficie de agarre sin ser excesiva.



Figura 4-4. Mordaza empleada en los ensayos de tracción.

Una vez preparada la máquina de ensayo se procede del siguiente modo:

- Calibración y balanceo de la máquina.
- Colocación de la probeta. Este punto es clave para realizar el ensayo de forma adecuada, pues debemos asegurar que se mantengan los ángulos escogidos respecto la dirección de aplicación de la carga, de tal forma que las láminas de  $90^\circ$  estén realmente a  $90^\circ$  y las de  $0^\circ$  a  $0^\circ$  respecto a esta dirección. Para centrar y alinear la probeta se ha hecho uso de una escuadra. Una vez colocada se procede a el agarre a las mordazas, que se realiza girando las llaves con las que cuenta la máquina de forma manual en la dirección indicada mediante flechas.
- Sujeción del extensómetro a la probeta.
- Conectar la máquina de ensayo con el ordenador pulsando la tecla "IEE488" del panel de control.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-5. Colocación de la probeta (a); Dirección de apriete de la mordaza(b); Colocación del extensómetro(c).

- Iniciar el programa *Test Control Instron Series 44 V17-6*.
- En la primera de las pantallas que ofrece el programa, elegir el tipo de ensayo (*Tracción en sección rectangular con extensómetro* (*Resistencia, Límite, Módulo y deformación en rotura*)), el nombre elegido (*Mar-Nº de probeta-Fecha del día de ensayo*), el material (*Fibra de carbono*), la norma empleada (*sin especificar*), el cliente (*LERM*), el número de probetas que se deben ensayar (*1*), si estas han sufrido mecanizado (*sin especificar*) y el acondicionamiento de la probeta (*sin especificar*).

Figura 4-6. Programa de gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron. Esquema pantalla 1.

- La segunda pantalla permite completar los datos de la probeta a ensayar, iniciar el ensayo y visualizar en pantalla los datos leídos de fuerza (N) y apertura del extensómetro (mm). En primer lugar, se han rellenado los datos del ensayo indicando el espesor (h) y el ancho de la probeta (b), así como la velocidad de ensayo. Esta última se ha variado según el tipo de ensayo. Cuando se han llevado los laminados hasta la rotura se ha elegido la velocidad máxima especificada en la norma UNE-EN 2561:1995 [2], de 2 mm/min. Sin embargo, al llevar cada panel hasta un porcentaje determinado de su carga de rotura se han cargado a una velocidad de 0.5 mm/min, bajándose esta a 0.2 mm/min al acercarse la carga a la buscada para afinar en el resultado. En segundo lugar, se ha reseteado la grafica pulsando los comandos “Reset”, “Bal” y limpiar gráfica. A continuación, se da inicio al ensayo pulsando la flecha hacia arriba. Una vez realizado el ensayo se pulsa la parada y se graban los resultados dándole al icono de grabar.

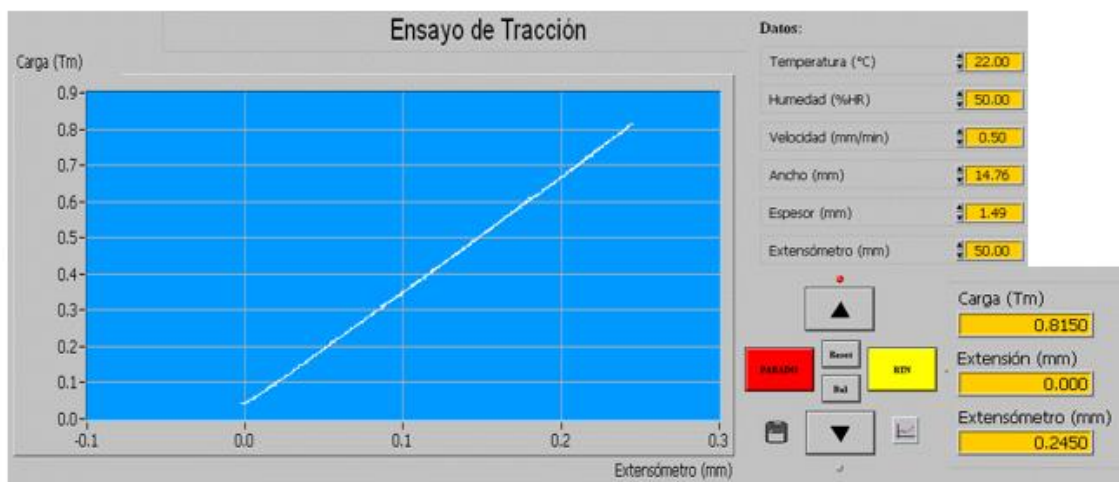


Figura 4-7. Programa de gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron. Esquema pantalla 2.

### 4.3 Resultados de los ensayos de tracción

En el estudio que nos ocupa, es decir, en la comparación de la resistencia y el daño sufrido por cada uno de los paneles fabricados, se han realizado dos tipos de ensayos: ensayos hasta la rotura y ensayos hasta un porcentaje determinado de la carga de rotura experimental de cada panel.

El primer tipo de ensayo al que nos referimos, es decir, el ensayo hasta la rotura de las probetas, ha permitido hacer una estimación de la resistencia y rigidez de cada laminado, mientras que los ensayos realizados a un porcentaje determinado de la carga de rotura se han empleado para la comparación de daño a escala microscópica.

Estos ensayos no se han realizado de forma conjunta. En primer lugar, se ensayaron una serie de probetas a rotura, y una vez determinada la resistencia de cada laminado, se ensayaron probetas al 80% y al 50% de la carga de rotura de su panel. Conforme se fueron observando resultados se tomó la decisión de ensayar a otros porcentajes de carga y comparar el comportamiento de ambos paneles. El resto de porcentajes de carga elegidos fue: 30%, 40%, 60%, 70% y 90%. A medida que se fue avanzando en el estudio, el hecho de tener una menor cantidad de probetas disponibles hizo que el número de probetas ensayadas por carga disminuyera. Este será un punto a tener en cuenta en el análisis de resultados, ya que un menor número de probetas puede provocar una mayor dispersión en los resultados, por lo que serán más fiables aquellos resultados obtenidos de la comparativa de un mayor número de probetas.

Como se ha comentado en la sección 4.2, el programa de toma de datos disponible en el LERM capta datos de fuerza (N) frente a apertura del extensómetro (mm). Sin embargo, a la hora de comparar los resultados obtenidos para cada laminado será más útil expresar los resultados en tensión (MPa) frente a las deformaciones que se producen en la dirección de la carga. Para pasar de unos datos a otros se usarán las ecuaciones (4-1) y (4-2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4-1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4-2)$$

Donde  $A$  se refiere al área de la sección de la probeta,  $\Delta L$  a la apertura del extensómetro a partir de su apertura inicial, y  $L_0$  a la apertura inicial de este (50 mm).

#### 4.3.1 Tracción hasta la rotura

El primer paso a seguir en la realización de ensayos fue la determinación de la tensión de rotura. Se define esta como la tensión máxima que es capaz de soportar un laminado antes de que se produzca la rotura catastrófica y viene dada por la ecuación (4-3), donde  $F_R$  representa la fuerza que aguanta la probeta en el instante de la rotura (fuerza máxima que aguanta la probeta).

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A} \quad (4-3)$$

Como se verá en la exposición de resultados del presente apartado, los laminados presentan un comportamiento elástico lineal hasta la rotura, lo cual permite determinar el módulo de elasticidad de cada laminado en la dirección de la carga. Este se define como la pendiente de la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  y, se puede calcular, por tanto, mediante la expresión (4-4).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4-4)$$

La resistencia se calcula únicamente para aquellas probetas llevadas a la rotura mientras que la rigidez se obtiene para todas las muestras. En el ensayo a rotura se decidieron ensayar 5 probetas de cada laminado. En la determinación de ambas propiedades se hará un promedio de las probetas ensayadas, por lo cual será de utilidad determinar las magnitudes de las expresiones (4-5) a (4-8) como indicadores de la dispersión obtenida en los resultados.

$$\text{Valor medio} \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4-5)$$

$$\text{Desviación típica} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (4-6)$$

$$\text{Coeficiente de variación} \quad C. C. = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (4-7)$$

$$\text{Error relativo} \quad \varepsilon_R = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \quad (4-8)$$

#### 4.3.1.1 Resultados obtenidos para el Panel A, [0<sub>2</sub>, 90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>.

Para obtener la tensión máxima que resiste el panel A se llevaron hasta la rotura las probetas numeradas de 1 a 5A en el corte de los laminados. Las características geométricas medidas en cada una de las probetas, que serán útiles en análisis posteriores, se detallan en la tabla 4-1.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
1A	14.98	1.53	22.92
2A	15	1.53	22.95
3A	14.77	1.55	22.89
4A	15.02	1.55	23.28
5A	14.94	1.55	23.16

Tabla 4-1. Dimensiones medias de las probetas del panel A ensayadas a rotura.

El ensayo realizado en el laboratorio permitió medir una nube de puntos para cada probeta que son una muestra de la evolución de la fuerza aplicada frente a la apertura del extensómetro. Mediante las ecuaciones anteriormente expuestas, esta nube de puntos ha permitido calcular, por un lado, el diagrama tensión-deformación ( $\sigma - \epsilon$ ) al que se ha visto sometido cada una de las probetas, y, por otro, las propiedades de resistencia y rigidez.

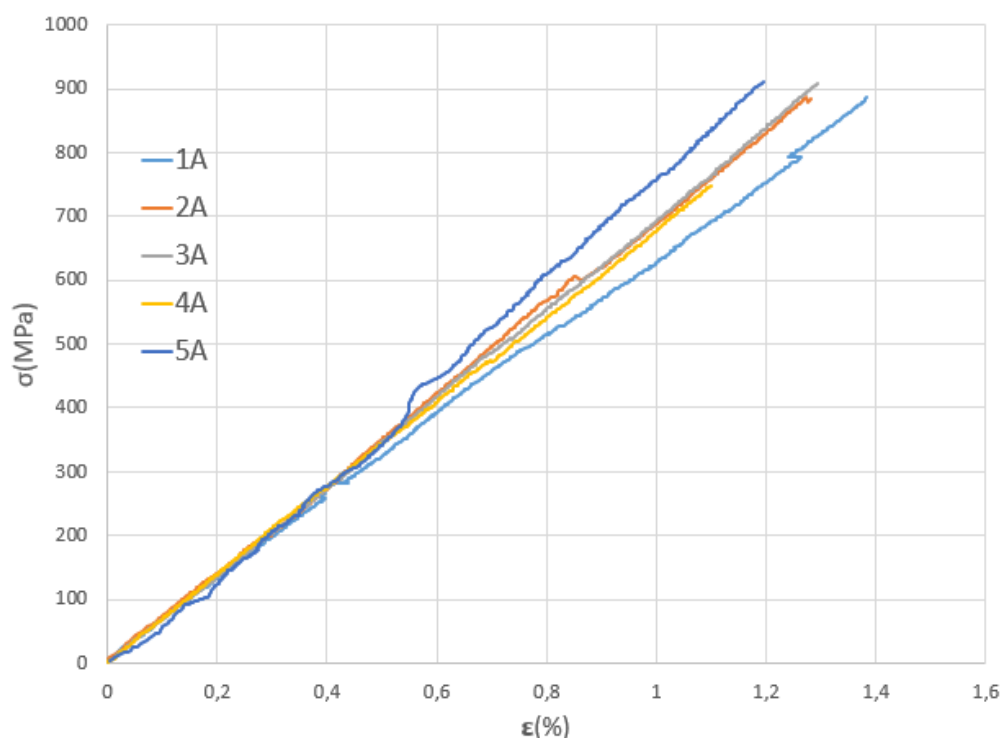


Gráfico 4-1. Diagrama  $\sigma - \epsilon$  para el ensayo a rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

En el análisis de las curvas  $\sigma - \epsilon$  obtenidas se observa cómo las curvas se ajustan razonablemente bien para todas las muestras a bajos niveles de cargas. Sin embargo, conforme aumenta el nivel de carga se aprecia que las curvas obtenidas para las probetas 1A y 5A se alejan de la tendencia general, apreciándose una menor y una mayor pendiente, respectivamente, en relación al resto de curvas. Esto es un indicador de que estas probetas son las que van a presentar mayor dispersión a la hora del cálculo del módulo de Young. También se aprecian variaciones en la tensión máxima soportada por cada una de las probetas. Ambos fenómenos se aprecian más claramente en la tabla 4-2, donde se exponen de forma numérica la fuerza máxima que ha aguantado cada una de las probetas, el área de la sección, la tensión de rotura y el módulo elástico.

Probeta	$F_{m\acute{a}x}(N)$	Área (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_R(MPa)$	E(GPa)
1A	20296.89	22.9194	885.5768	64.8
2A	20718.72	22.95	902.7765	71.23
3A	20797.2	22.8935	908.43252	70.1
4A	17402.94	23.281	747.5169	67.5
5A	21071.88	23.1570	909.9575	76.1

Tabla 4-2. Propiedades de rigidez y resistencia de las probetas 1 a 5 A.

A partir de estos resultados se estimaron los valores medios de tensión de rotura y rigidez del laminado, así como una serie de magnitudes que permiten hacerse una idea, mediante datos numéricos, de la dispersión ya observada en la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  en los resultados. En primer lugar, se analizan los resultados de resistencia obtenidos. A partir de la tensión máxima que ha aguantado cada probeta se ha calculado la que se considerará como la resistencia del laminado A en la dirección de la carga (X), como la media de estos valores, tal y como se indica en el gráfico 4-2.

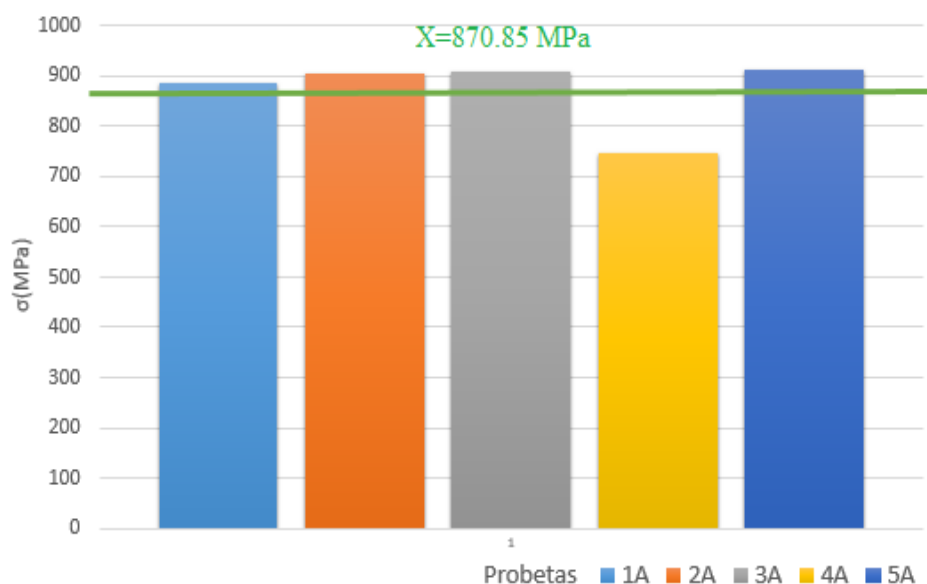


Gráfico 4-2. Resistencia de cada probeta del panel A y valor medio.

En la tabla 4-3 se exponen los valores desviación típica, coeficiente de variación y errores relativos respecto a las tensión máxima ( $\epsilon_{R_{m\acute{a}x}}$ ) y mínima obtenidas ( $\epsilon_{R_{m\acute{i}n}}$ ).

Resistencia	
Valor medio	870.85 MPa
Desviación típica	69.62 MPa
Coeficiente de variación	7.99 %
Valor máximo	909.96 MPa
Valor mínimo	747.52 MPa
$\epsilon_{R_{m\acute{a}x}}$	4.49%
$\epsilon_{R_{m\acute{i}n}}$	14.16%

Tabla 4-3. Características de resistencia del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

En segundo lugar, se analizan los resultados obtenidos para el módulo de Young. Al igual que la tensión de rotura este se calcula como una media de los módulos elásticos calculados para cada una de las probetas, tal y como se ve en el gráfico 4-3. A diferencia de la carga de rotura, que solo se puede estimar con las probetas llevadas hasta esta carga, el módulo elástico se puede estimar como una media de todas las probetas ensayadas,

debido al comportamiento elástico lineal del material hasta la rotura. En la presente sección se analizarán los resultados correspondientes a las probetas de la 1 a la 5 A, y en la sección 4.3.3 se hará un análisis de forma conjunta de los resultados obtenidos para todas las probetas.

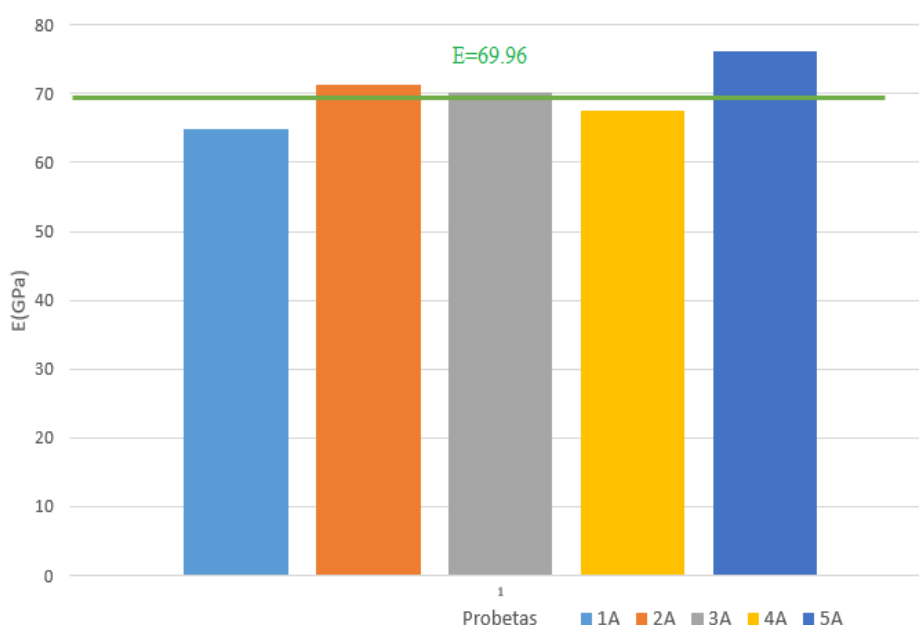


Gráfico 4-3. Rigidez de las muestras ensayadas a rotura y valor medio.

En la tabla 4-4 se exponen los valores desviación típica, coeficiente de variación y errores relativos respecto a al módulo elástico máximo ( $\varepsilon_{R_{máx}}$ ) y mínimo obtenidos ( $\varepsilon_{R_{min}}$ ).

Rigidez	
Valor medio	69.96 GPa
Desviación típica	4.24 GPa
Coeficiente de variación	6.06%
Valor máximo	76.1 GPa
Valor mínimo	64.8 GPa
$\varepsilon_{R_{máx}}$	8.78%
$\varepsilon_{R_{min}}$	7.37%

Tabla 4-4. Características de rigidez del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

Estos valores son un indicador de lo ya observado en la curva tensión-deformación obtenida. Teniendo en cuenta que el error relativo máximo expuesto en la tabla hace referencia al error respecto a la probeta con límite elástico más alto, es decir, la probeta 5A, mientras que el error relativo mínimo ha sido calculado con la probeta de menor límite elástico, es decir, la 1A, se ve que las probetas que más se alejan de la tendencia general de las curvas obtenidas son estas, tal y como se apreciaba en el gráfico 4-1. Este hecho se ve más claramente si se calculan los errores relativos en el resto de probetas, obteniéndose los siguientes resultados: 1.82% en la probeta 2A, 0.22% en la probeta 3A y 3.46% en la probeta 4A.

#### 4.3.1.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

Para obtener los resultados de resistencia y rigidez correspondientes al panel B se procede del mismo modo que en el panel A. En primer lugar, se muestran las características geométricas de las probetas del panel B ensayadas a rotura.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
1B	14.64	2.20	32.208
2B	15	2.28	34.2
3B	14.85	2.26	33.561
4B	14.97	2.27	33.9819
5B	15.07	2.35	35.4145

Tabla 4-5. Dimensiones medias de las probetas del panel B ensayadas a rotura.

A continuación, se calcula la gráfica  $\sigma$ - $\epsilon$  a partir de la nube de puntos extraída del ensayo en laboratorio.

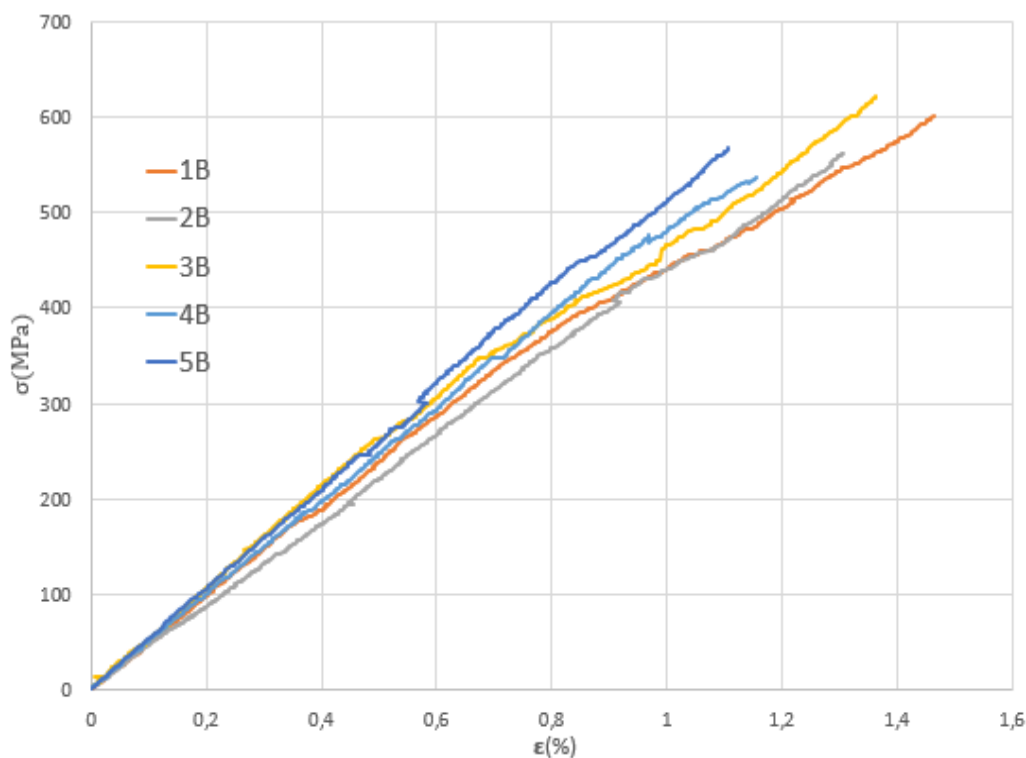


Gráfico 4-4. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo a rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

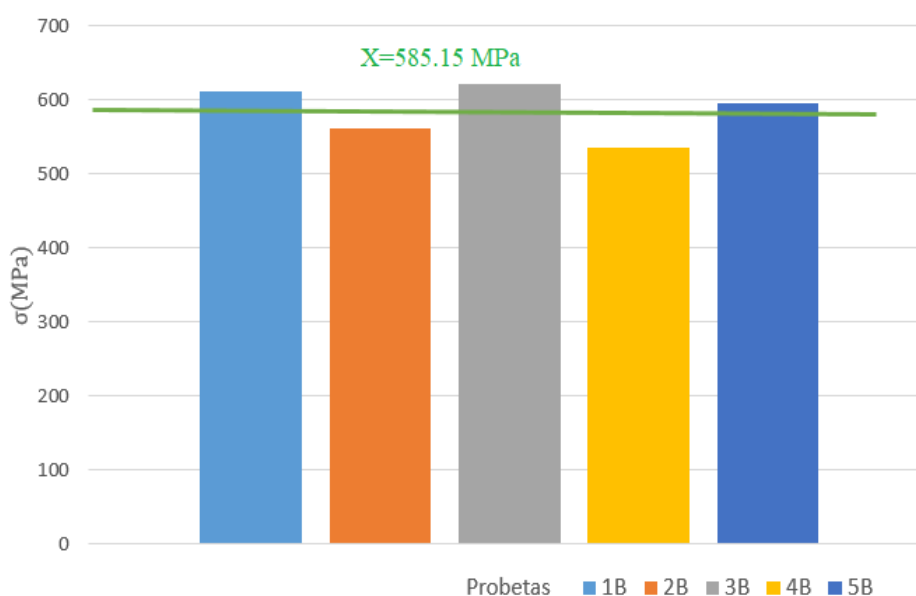
En el análisis de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  obtenidas se observa como las curvas se ajustan razonablemente bien para todas las muestras a bajos niveles de carga, pero se alejan conforme aumenta la tensión. Al igual que ocurría en el panel A, se aprecian variaciones la tensión máxima soportada por cada una de las probetas. Ambos fenómenos se aprecian más claramente en la tabla 4-6, donde se exponen de forma numérica.



Probeta	$F_{m\acute{a}x}(N)$	Área (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_R(MPa)$	E(GPa)
1B	19698.48	32.208	611.6	44.5
2B	19217.79	34.2	561.92	46.68
3B	20856.06	33.561	621.44	42.15
4B	18207.36	33.9819	535.8	46.99
5B	21071.26	35.4145	595	46.91

Tabla 4-6. Propiedades de rigidez y resistencia de las probetas 1 a 5 B.

A partir de estos resultados se estimaron los valores medios de tensión de rotura y rigidez del laminado. En primer lugar se calcularon los valores de resistencia, así como la desviación típica, coeficiente de variación y errores relativos respecto a las tensión máxima ( $\varepsilon_{R_{m\acute{a}x}}$ ) y mínima obtenidas ( $\varepsilon_{R_{min}}$ ).

Gráfico 4-5. Resistencia de cada probeta del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , y valor medio.

Resistencia	
Valor medio	585.15 MPa
Desviación típica	35.74 MPa
Coeficiente de variación	6.1 %
Valor máximo	621.44 MPa
Valor mínimo	535.8 MPa
$\varepsilon_{R_{m\acute{a}x}}$	6.2%
$\varepsilon_{R_{min}}$	8.43%

Tabla 4-7. Características de resistencia del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

En segundo lugar, se analizan los resultados obtenidos para el módulo de Young, calculando el valor medio, así como los valores desviación típica, coeficiente de variación y errores relativos respecto al módulo elástico máximo ( $\varepsilon_{R_{m\acute{a}x}}$ ) y mínimo obtenidos ( $\varepsilon_{R_{m\acute{i}n}}$ ).

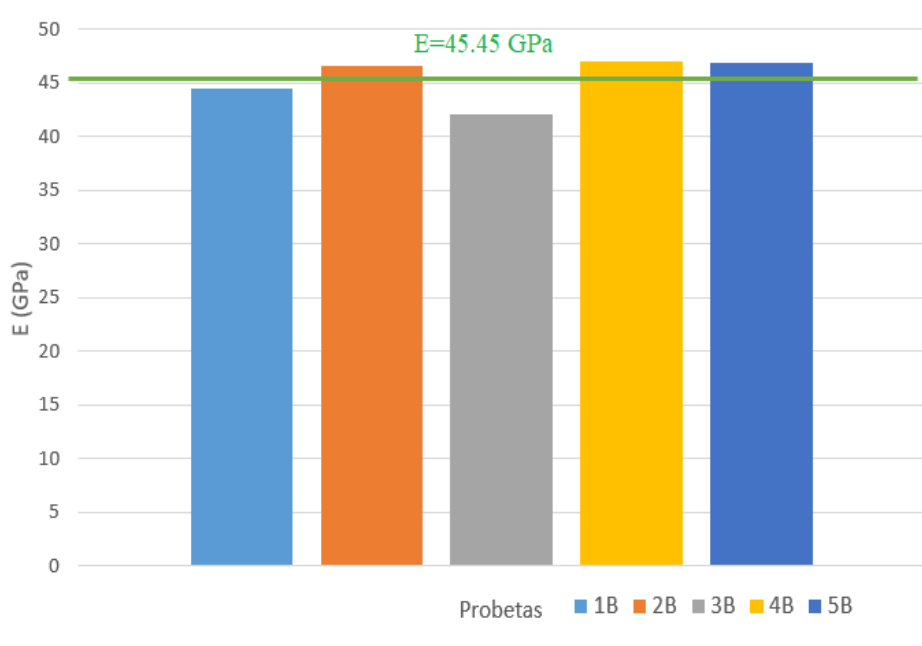


Gráfico 4-6. Rigidez de las muestras ensayadas a rotura del panel B y valor medio.

Rigidez	
Valor medio	45.45 GPa
Desviación típica	4.45 GPa
Coeficiente de variación	9.8%
Valor máximo	46.99 GPa
Valor mínimo	42.15 GPa
$\varepsilon_{R_{m\acute{a}x}}$	3.4%
$\varepsilon_{R_{m\acute{i}n}}$	7.26%

Tabla 4-8. Características de rigidez del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Estos resultados son una muestra de lo observado en la curva tensión-deformación obtenida, es decir, se observa una desviación típica en el módulo de Young muy pequeña, como ya indicaba el hecho de que todas las curvas siguen la misma tendencia, ajustándose bien las unas a las otras.

#### 4.3.1.3 Comparación de resultados en los ensayos de rotura entre ambos paneles

Una vez determinada las características de resistencia y rigidez de cada panel, que sientan las bases del análisis en el que se centra el presente proyecto, se procede al análisis y comparación de resultados. En la tabla 4-9 aparece una recopilación de los datos más significativos obtenidos de los ensayos a rotura.

Propiedad	Resistencia		Rigidez	
Panel	$A, [0_2, 90_2]_s$	$B, [0_2, 90_4]_s$	$A, [0_2, 90_2]_s$	$B, [0_2, 90_4]_s$
Valor medio	870.85 MPa	585.15 MPa	69.96 GPa	45.45 GPa
Desviación típica	69.62 MPa	35.74 MPa	4.24 GPa	4.45 GPa
Coefficiente de variación	7.99 %	6.1 %	6.06%	9.8%
Valor máximo	909.96 MPa	621.44 MPa	76.1 GPa	46.99 GPa
Valor mínimo	747.52 MPa	535.8 MPa	64.8 GPa	42.15 GPa
$\varepsilon_{R_{\max}}$	4.49%	6.2%	8.78%	3.4%
$\varepsilon_{R_{\min}}$	14.16%	8.43%	7.37%	7.26%

Tabla 4-9. Resumen de los resultados de resistencia y rigidez obtenidos para cada uno de los laminados fabricados.

A la hora de analizar resultados habrá que tener en cuenta que estos se pueden separar de la idea que se tiene como resultado del tratamiento tradicional con materiales isótropos, donde un mayor espesor de la sección es sinónimo de una mayor carga en Newton. En materiales anisótropos establecer esta relación no es tan sencillo, pues entran en juego múltiples factores: heterogeneidad y anisotropía de sus componentes, número de láminas que pueden formar un laminado, distintas orientaciones posibles y secuencias de apilado.

En el análisis experimental realizado en el presente proyecto el panel con con mayor espesor, aguanta una carga última media de 585.15 MPa, menor que el panel de menor espesor, de 870.85 MPa, siendo la diferencia de un 33 %. Es decir, al comparar dos laminados que únicamente se diferencian en el número de láminas orientadas a 90° en la dirección de la carga se obtiene que la resistencia del que tiene más láminas es de un  $\frac{1}{3}$  menor, lo cual es un dato significativo.

Otro dato de interés que se recoge en la tabla es que, según los valores obtenidos de desviación típica, coeficiente de variación y errores relativos para el análisis de resistencia de cada laminado, se observa una menor dispersión en los resultados del panel B, presentado el panel A un comportamiento menos homogéneo.

A pesar de las diferencias encontradas en el valor último de carga que aguanta cada laminado, si se comparan las gráficas 4-1 y 4-4 se observan que los valores máximos de deformación alcanzados por cada laminado son similares. En la tabla 4-10 se exponen los valores máximos de deformación alcanzados para cada probeta.

Panel	$A, [0_2, 90_2]_s$		$B, [0_2, 90_4]_s$	
Propiedad	$\varepsilon_{\max} (\%)$	$\sigma_{\max} (MPa)$	$\varepsilon_{\max} (\%)$	$\sigma_{\max} (MPa)$
1	1.38	885.57	1.48	611.6
2	1.3	902.78	1.31	561.92
3	1.29	908.43	1.36	621.44
4	1.1	747.52	1.15	535.8
5	1.19	909.96	1.1	595

Tabla 4-10. Deformación y carga de rotura para cada panel.

El hecho de que el material se deforme de manera similar en los dos laminados cuando uno aguanta un 33% de carga más que el otro se debe a las diferencias de rigidez en cada laminado. Tal y como se expone en la tabla 4-9 el panel A presenta un módulo de Young un 25% mayor que el panel A.

Por último, y como una manera de introducir la búsqueda de los distintos fallos internos que han podido provocar el fallo de las probetas, en las Figuras 4-8 y 4-9 se puede ver la zona de rotura de cada una de las probetas ensayadas a esta carga. Tal y como se introdujo en la sección 2, la rotura puede ir precedida de diferentes fallos internos en el material como son la rotura de fibras, la microfisuración de la matriz y la separación de las fibras de la matriz. En el caso de que la probeta esté formada por diferentes láminas también se puede producir la delaminación entre ellas. El hecho de que dos probetas pertenezcan al mismo panel no quiere decir que no puedan aparecer en ellas tipos de fallos distintos. Esto es debido principalmente a la falta de homogeneidad del material [1]. Por tanto aunque sea necesario realizar un análisis del daño interno del material para determinar cuál de estos mecanismos de fallo ha provocado la rotura del material, en estas imágenes se pueden observar cuánto se ha delaminado la probeta o la rotura de las láminas a  $90^\circ$ , datos que pueden resultar orientativos.

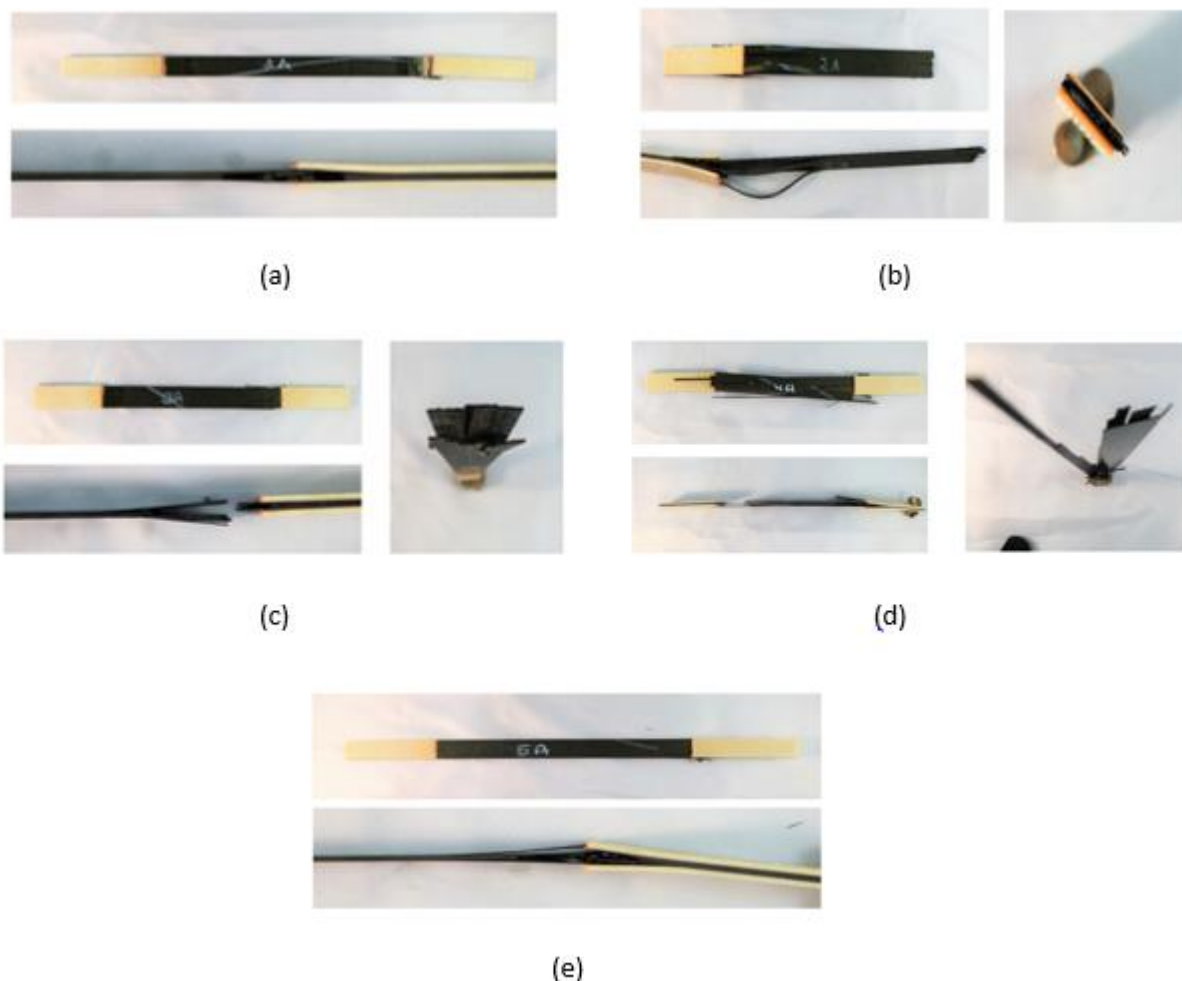


Figura 4-8. Zona de rotura de las probetas: 1A (a); 2A (b); 3A (c); 4A (d); 5A (e).

Analizando las probetas del panel A, se observa que cada una de las probetas ha roto de forma distinta. En las probetas 1 y 5A se aprecia una rotura menos catastrófica que en el resto de probetas. Se ve que las láminas de  $0^\circ$  siguen unidas en el “span” y adheridas a los tacos de forma que la probeta no se ha separado en dos o más trozos independientes si no que sigue habiendo una zona de unión a pesar de la rotura.

En las probetas de la 2 a la 4A se aprecia un fallo más catastrófico. Se ha producido la separación de la probeta en dos o más fragmentos. Se observa también la rotura en las láminas de  $90^\circ$ , pero se aprecia además un mayor daño en las láminas a  $0^\circ$ .

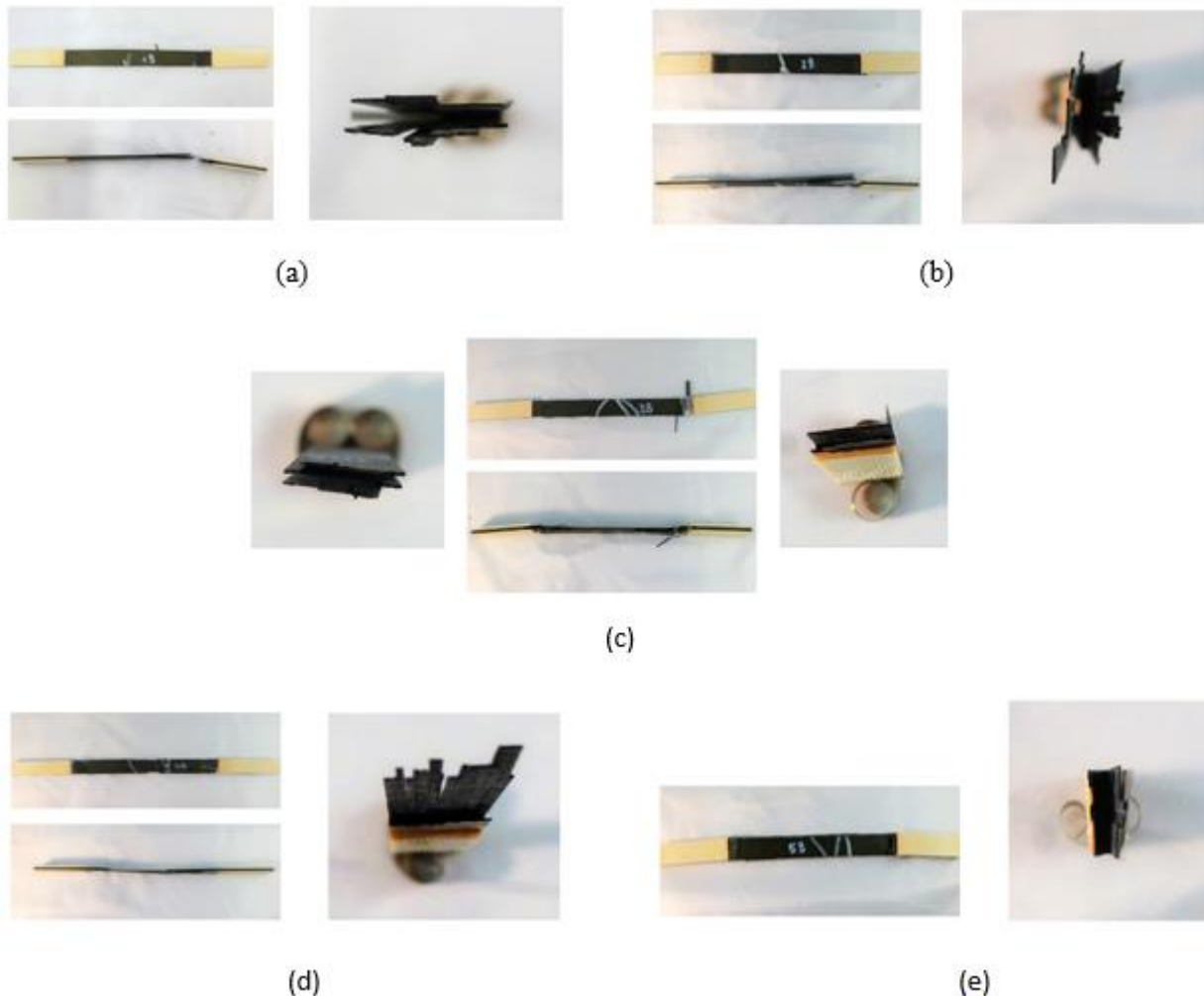


Figura 4-9. Zona de rotura de las probetas: 1B(a); 2B (b); 3B (c); 4B (d); 5B (e).

En el análisis de las probetas correspondientes al panel B se observa un comportamiento más homogéneo, de características:

- Todas las probetas se han dividido en dos trozos o más, produciéndose la rotura tanto de las láminas a  $0^\circ$  como de las láminas a  $90^\circ$ .
- Separación entre las láminas de  $0^\circ$  y de  $90^\circ$  en la mayor parte de la probeta.
- Mayor zona de rotura en las láminas a  $90^\circ$ , quedando menos porción de probeta intacta, en comparación con las probetas del panel A.

Es decir, en general, se aprecia una rotura más catastrófica en el panel B que en el panel A. En el análisis del daño sufrido por cada panel se hará hincapié en los tipos de fallo que aparecen en cada laminado y cómo estos pueden afectar a este resultado.

Por último, comentar un efecto interesante observado durante los ensayos. En las curvas tensión-deformación obtenidas, tanto a rotura como a cargas inferiores, se observa que para una misma muestra hay tramos donde la pendiente varía ligeramente. Este fenómeno es debido, por un lado, a que la máquina registra puntos no equiespaciados en deformaciones y tensiones y, por otro, al hecho de que las mordazas puedan resbalar ligeramente y no aumente la fuerza aplicada hasta que consigan volver a agarrar. Aunque una vez lo haga la curva vuelve a subir con la misma pendiente pudiéndose generar tramos que no se ajustan a la pendiente real de la curva.

Además, durante el ensayo a altos niveles de carga se ha observado que cuando tiene lugar el primer aviso sonoro de la rotura de la lámina a  $90^\circ$  se produce el deslizamiento del extensómetro, de tal manera que las curvas hacen un pico que ha sido eliminado a la hora de representar unas curvas frente a otras. Este pico es tal que cuando se produce la rotura sonora de una lámina de  $90^\circ$  se produce un descenso brusco de las deformaciones, aunque la curva siga aumentando a partir de ese punto con la misma pendiente desde ese punto. En el gráfico 4-7 se aprecia la curva correspondiente a la probeta 8B sin modificar.

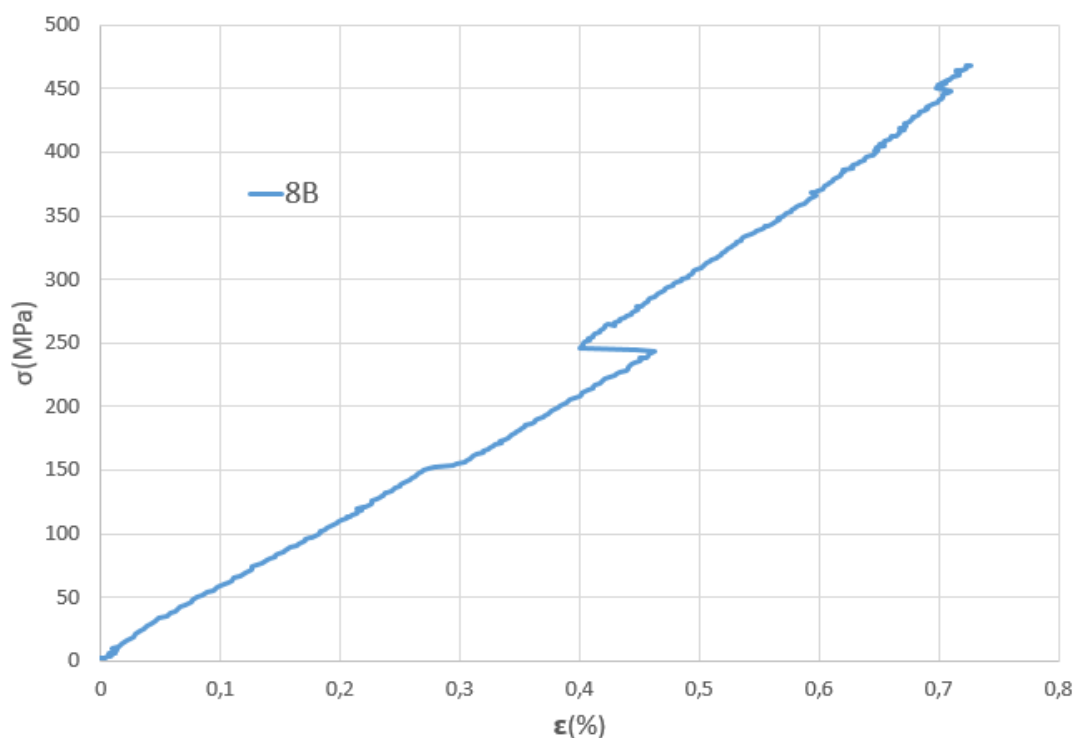


Gráfico 4-7 . Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo a rotura del panel 8B.

#### 4.3.2 Tracción hasta un porcentaje de la carga de rotura

Los ensayos realizados hasta un nivel de tensión tal que no provoca el fallo del laminado tiene el objetivo de introducir daño en las láminas orientadas a  $90^\circ$ , de tal manera que se pueda realizar un estudio del inicio y la evolución del fallo en cada laminado fabricado, y, posteriormente, proceder a la comparación de ambos. Dichas comparaciones se realizarán entre probetas ensayadas al mismo porcentaje de la carga de rotura experimental obtenida para el panel del que proceden.

La máquina donde se realiza el ensayo ha sido detenida de forma manual cuando se ha llegado a la carga deseada. El programa de tratamiento de datos muestra los valores de carga en toneladas, de forma que para calcular el valor de parada en estas unidades se ha procedido tomando el valor medio de la tensión de rotura de cada panel y aplicándole el porcentaje de carga al que se quiere realizar el estudio a dicho valor. A continuación, se

multiplican para cada probeta *ancho (mm) x espesor (mm) x valor de carga media en MPa con el porcentaje de carga aplicado* y el resultado se divide entre el valor de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$ , obteniéndose el resultado en Kg de carga.

#### 4.3.2.1 Tracción hasta el 90% de la carga de rotura

Hasta el 90% de la tension media de rotura se ensayó unicamente una probeta de cada panel.

##### 4.3.2.1.1 Resultados obtenidos para el Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .

La probeta ensayada al 90% de la carga de rotura en el panel A fue la 25A, cuyas dimensiones aparecen recogidas en la tabla 4-11.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
25A	14.76	1.49	21.99

Tabla 4-11. Dimensiones de la probeta del Panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 90% de la tensión media de rotura.

El diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  obtenido se aprecia en el gráfico 4-8.

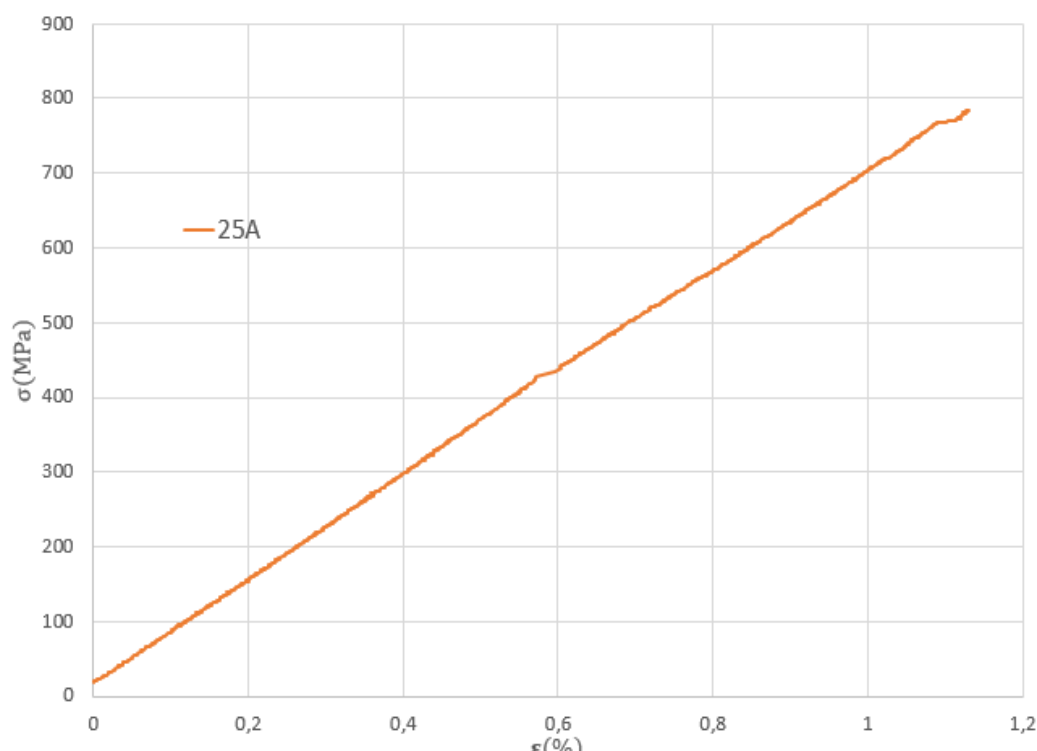


Gráfico 4-8. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 90% de la carga de rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

En la tabla 4-11 vienen recogidos el porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza y tensión máxima al que ha sido ensayada y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
25A	89.996	17236.17	783.73	71.85

Tabla 4-12. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo de Young de la probeta 25A.

#### 4.3.2.1.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

La probeta ensayada al 90% de la carga de rotura en el panel B fue la 25B, cuyas dimensiones aparecen recogidas en la tabla 4-13.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
25B	14.97	2.34	35.03

Tabla 4-13. Dimensiones de la probeta del Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 90% de la tensión media de rotura.

El diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  obtenido se aprecia en el gráfico 4-9.

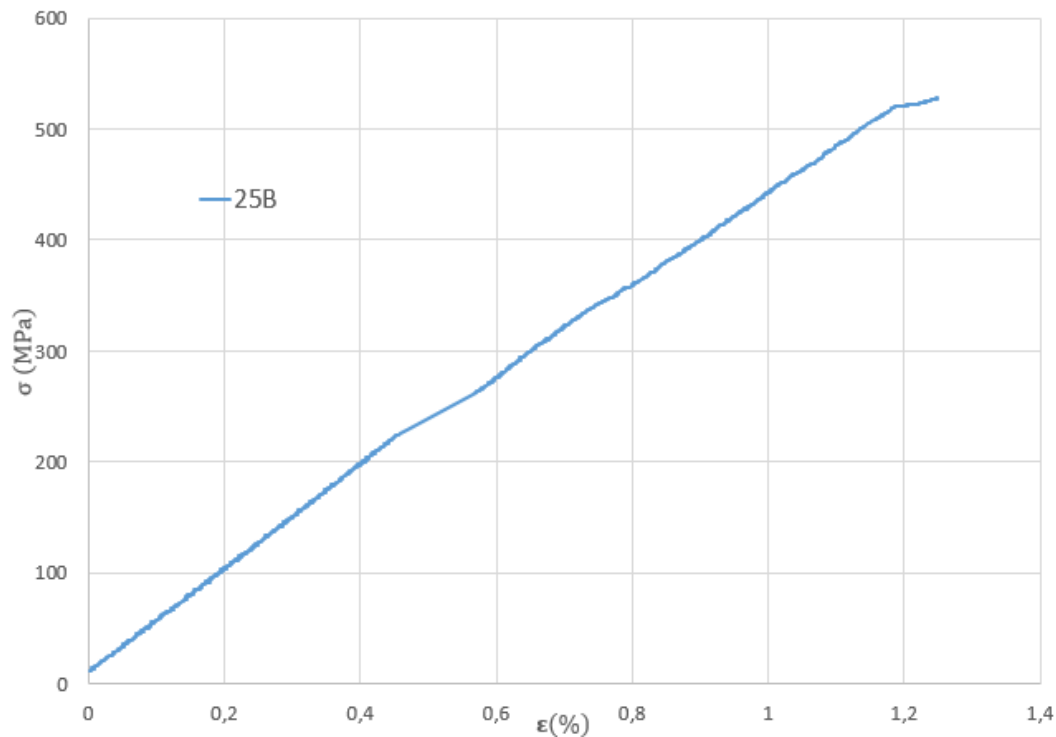


Gráfico 4-9. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 90% de la carga de rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .



En la tabla 4-14 vienen recogidos el porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza y tensión máxima y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	E(GPa)
25B	90.214	18491.85	527.89	46.12

Tabla 4-14. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de la probeta 25B.

#### 4.3.2.2 Tracción hasta el 80% de la carga de rotura

Hasta el 80% de la tensión media de rotura se ensayaron 5 probetas de cada panel.

##### 4.3.2.2.1 Resultados obtenidos para el Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .

Las probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura en el panel A fueron las numeradas de la 6 a la 10A, cuyas dimensiones aparecen recogidas en la tabla 4-15.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
6A	14.96	1.55	23.19
7A	14.95	1.52	22.72
8A	14.98	1.53	22.91
9A	14.97	1.53	22.9
10A	14.54	1.53	22.25

Tabla 4-15. Dimensiones de las probetas del Panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 80% de la tensión media de rotura.

En el gráfico 4-10 se puede ver el diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  que ha descrito cada una de las probetas al ser ensayada. Se aprecia que todas las muestras se ajustan bastante bien unas a otras para bajos niveles de carga y que conforme esta aumenta, ligeras variaciones en la pendiente, es decir, en el módulo de Young, provoca que se vayan separando. La máxima separación en deformaciones que se aprecia para un mismo valor de tensión es del 0.075%.

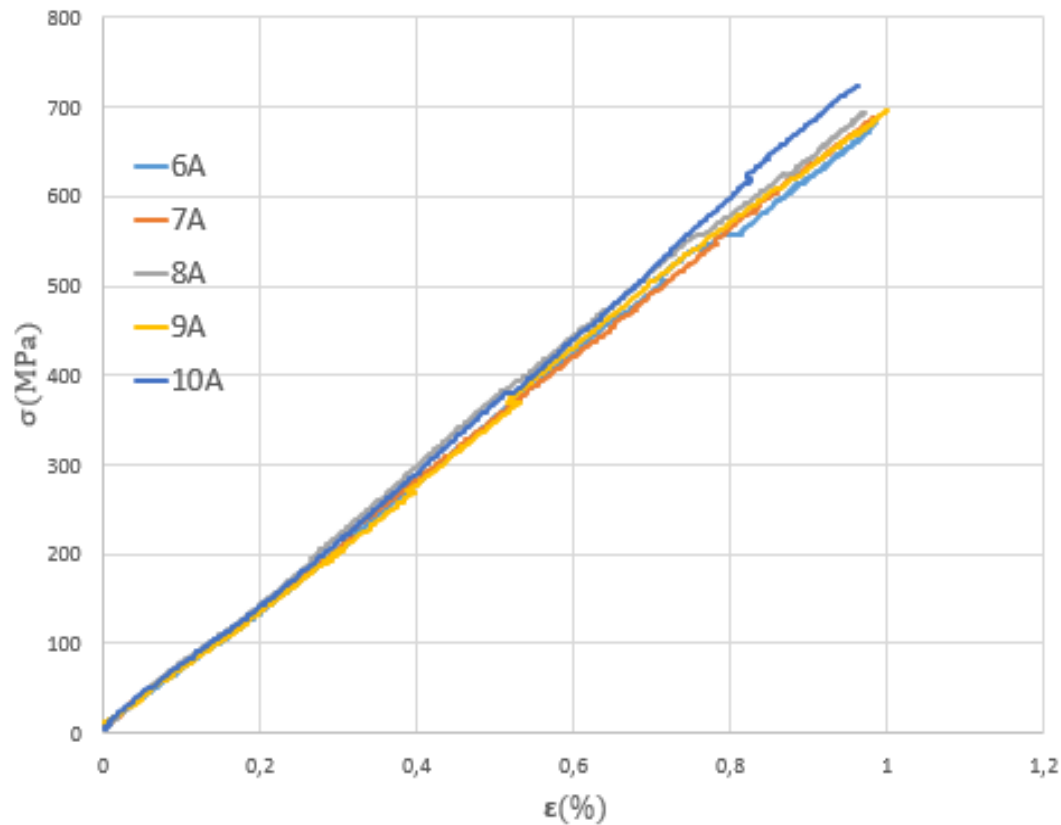


Gráfico 4-10. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 80% de la carga de rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

Para ver más claramente las diferencias entre cada ensayo, en la tabla 4-16 se recogen el porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza y tensión máxima y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
6A	78.5	15852.6	683.61	72.75
7A	78.93	15617.52	687.39	70.86
8A	79.7	15902.01	694.11	74.16
9A	79.89	15931.44	695.7	71.53
10A	83.08	16098.21	723.51	76.29

Tabla 4-16. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 6 a 10A.

#### 4.3.2.2.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

Las probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura en el panel B fueron, en concordancia con el panel A para seguir la misma nomenclatura, las numeradas de la 6 a la 10B, cuyas dimensiones aparecen recogidas en la tabla 4-17.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
6B	15.02	2.26	33.94
7B	14.95	2.26	33.79
8B	15.04	2.24	33.69
9B	15.01	2.25	33.77
10B	14.83	2.26	33.52

Tabla 4-17. Dimensiones de las probetas del Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 80% de la tensión media de rotura.

En el gráfico 4-11 se puede ver el diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  que ha descrito cada una de las probetas al ser ensayada. Se observan que todas se ajustan bastante bien, siendo las que más se separan de la tendencia general las probetas 7B y 10B, teniendo una mayor y menor pendiente respectivamente, y, correspondiéndose por tanto con las probetas de mayor y menor módulo elástico en este ensayo. A pesar de la variación que se observa, si se calcula el error relativo de estas muestras con respecto al valor medio del módulo elástico obtenido de las 5 muestras ensayadas al 80% del valor medio de la carga de rotura para el panel B se obtienen unos valores de 6.07% para la probeta 7B y de 3.18% para la probeta 10B. La máxima separación que se produce en deformaciones para un mismo valor de tensión es de 0.18%. Estos errores están dentro de lo que ya se manejaba en el análisis de los resultados de las probetas a rotura y son debidos a heterogeneidades del material. Para apreciar mejor los parámetros característicos de cada probeta la tabla 4-18 recoge datos numéricos que indican el módulo elástico calculado para cada una de las probetas, así como la fuerza y tensión máxima a la que han sido sometidas. A partir de esta última se calcula el porcentaje real de carga respecto al valor medio de la tensión de rotura calculada para el panel B.

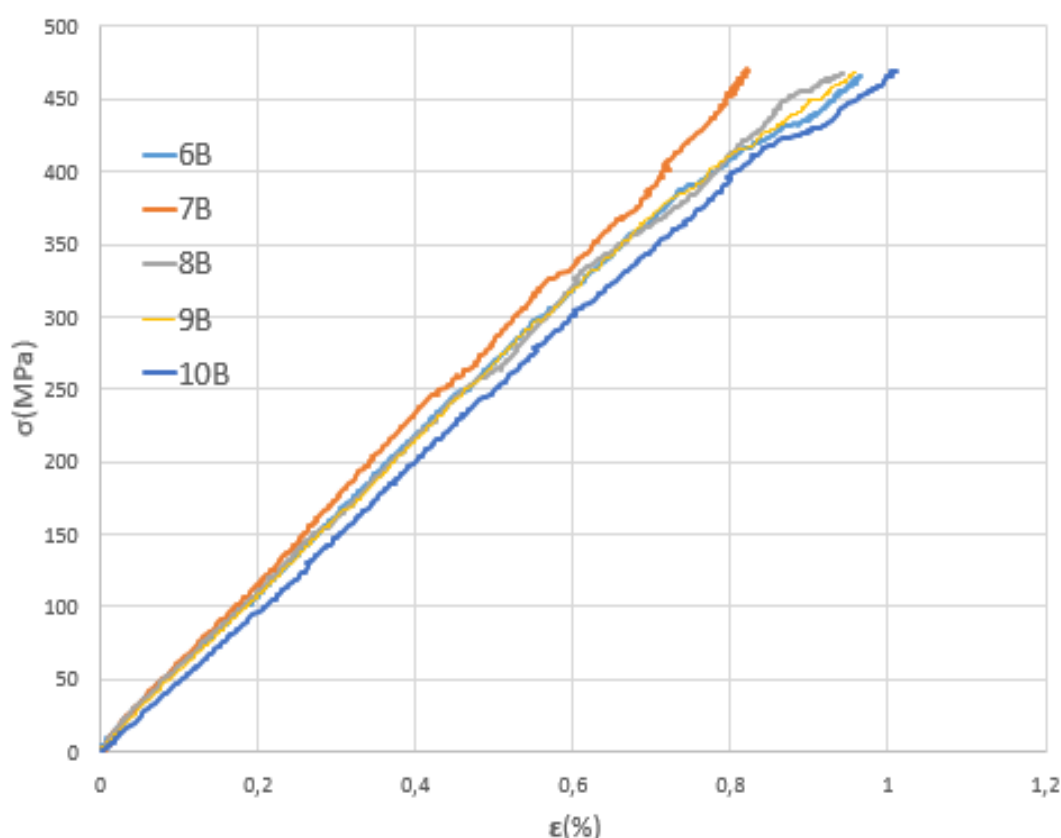


Gráfico 4-11. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 80% de la carga de rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
6B	79.72	15833.34	466.51	47.34
7B	80.37	15892.2	470.32	51.76
8B	80.02	15774.48	468.22	48.76
9B	80.13	15833.34	468.86	48.78
10B	80.17	15725.43	469.14	47.22

Tabla 4-18. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 6-10B.

#### 4.3.2.3 Tracción hasta el 70% de la carga de rotura

##### 4.3.2.3.1 Resultados obtenidos para el Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .

Las probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura en el panel A fueron las numeradas como 20 y 24A, cuyas dimensiones aparecen recogidas en la tabla 4-19.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
20A	15.02	1.54	23.13
24A	15	1.51	23.16

Tabla 4-19. Dimensiones de las probetas del Panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 70% de la tensión de rotura.

En el gráfico 4-12 se puede ver el diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  que ha descrito cada una de las probetas al ser ensayada. Se ve que ambas curvas se ajustan casi a la perfección siendo la máxima separación en la deformación para un mismo nivel de tensión de 0.012% y el módulo de Young muy cercano.

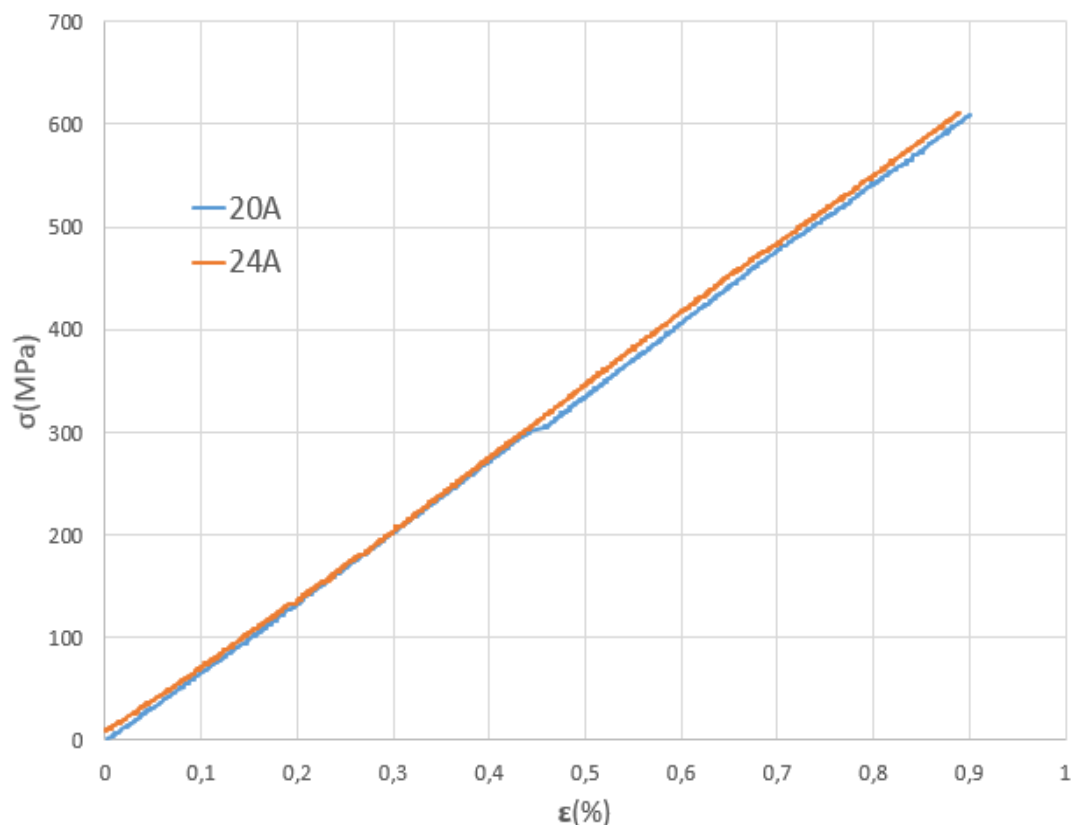


Gráfico 4-12. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 70% de la carga de rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

En la tabla 4-11 se recogen el porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza, tensión máxima y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
20A	69.98	14096.97	609.47	69.49
24A	70.2	16098.21	611.4	70

Tabla 4-20. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 20A y 24A.

#### 4.3.2.3.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

Las probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura en el panel B fueron las numeradas como 23 y 24B, cuyas dimensiones aparecen recogidas en la tabla 4-21.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
23B	14.96	2.33	34.86
24B	14.83	2.32	34.4

Tabla 4-21. Dimensiones de las probetas del Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 70% de la tensión media de rotura.

En el gráfico 4-13 se puede ver el diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  que ha descrito cada una de las probetas. A simple vista se ve que ambas tienen un distinto módulo elástico, que, como ya se ha comentado, se debe a heterogeneidades del laminado. La máxima variación en deformación para la misma tensión es del 0.071%, que entra dentro de las variaciones observadas en el resto de casos.

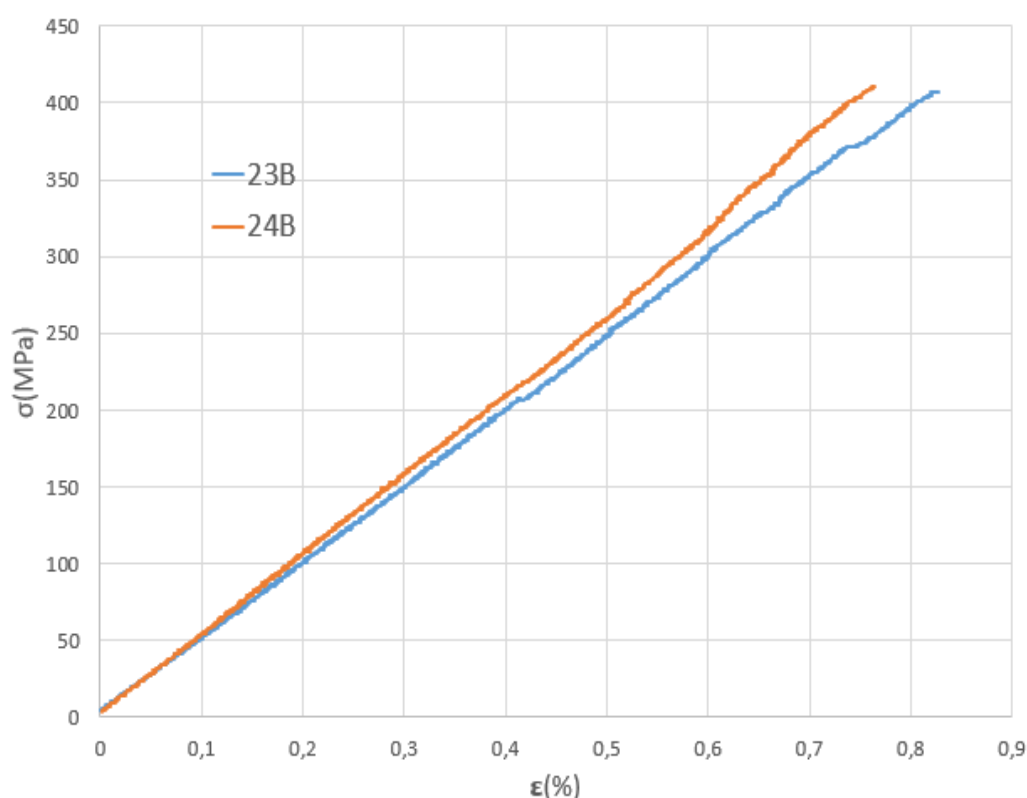


Gráfico 4-13. . Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 70% de la carga de rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

En la tabla 4-22 se dan resultados numéricos de porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, valores de fuerza, tensión máxima y módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
23B	69.64	14204.88	407.48	49.4
24B	70.08	14106.78	410.08	51.6

Tabla 4-22. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 6 a 10A.

#### 4.3.2.4 Tracción hasta el 60% de la carga de rotura

Hasta el 60% de la tensión media de rotura se ensayaron 2 probetas de cada panel.

##### 4.3.2.4.1 Resultados obtenidos para el Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .

Las probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura en el panel A fueron las numeradas como 21 y 22A.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
21A	15.01	1.53	22.96
22A	15.04	1.55	23.31

Tabla 4-23. Dimensiones de las probetas del Panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 60% de la tensión media de rotura.

Las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de estas muestras se recogen en el gráfico 4-14. Se ve que presentan un diferente módulo elástico, siendo la máxima variación en deformación alcanzada para un mismo nivel de tensión de 0.047%.

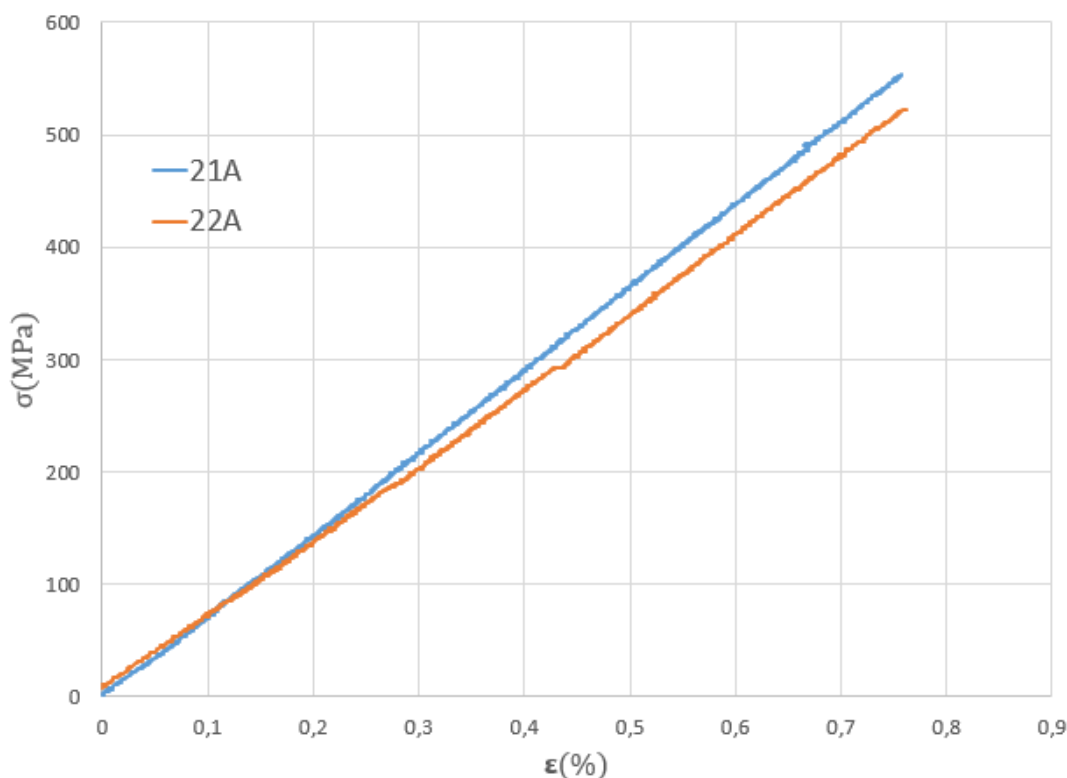


Gráfico 4-14. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 60% de la carga de rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

En la tabla 4-24 se recogen los datos numéricos correspondientes al porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza, tensión y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
21A	63.58	12713.76	553.73	73.53
22A	60.01	12184.02	522.65	66.54

Tabla 4-24. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 21A y 22A.

#### 4.3.2.4.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

Las probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura en el panel B han sido las numeradas como 21 y 22B, cuyas dimensiones se recogen en la tabla 4-25.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
21B	15.06	2.33	33.09
22B	15	2.33	34.95

Tabla 4-25. Dimensiones de las probetas del Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 60% de la tensión media de rotura.

En el gráfico se recogen las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  correspondientes a estas muestras, donde se aprecia una ligera variación de pendiente con una separación máxima en la deformación para un mismo nivel de tensión del 0.081%.

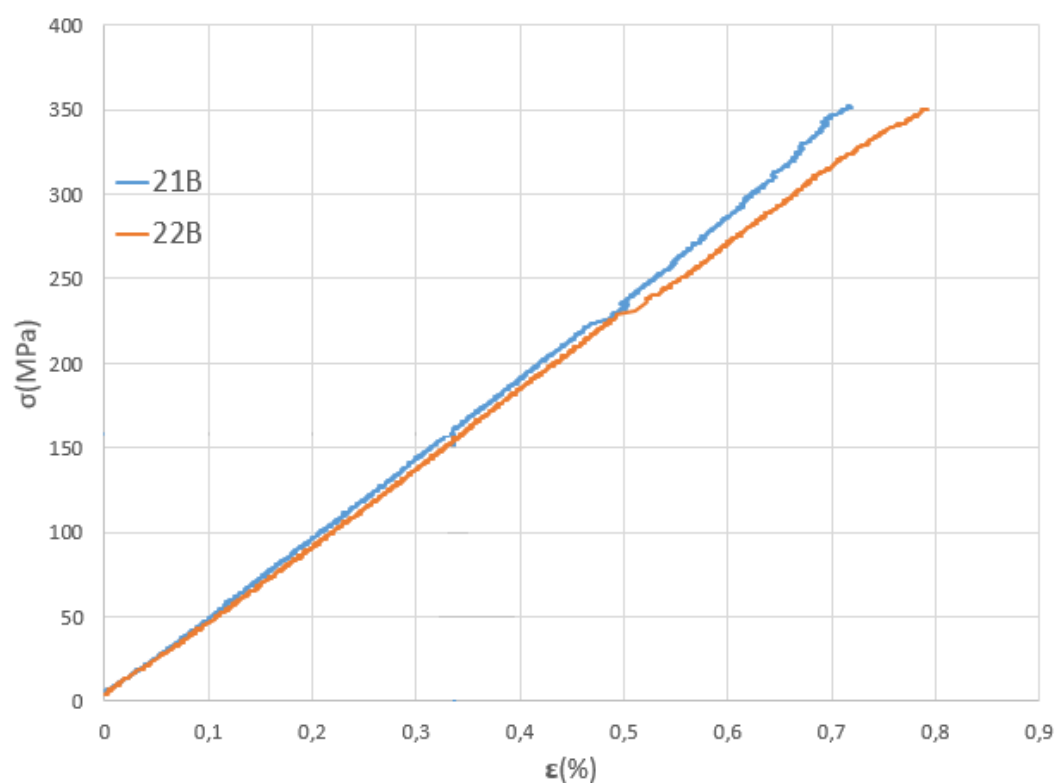


Gráfico 4-15. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 60% de la carga de rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

En la tabla 4-25 se dan los datos de porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza y tensión máxima al que ha sido ensayada y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
21B	60.2	12360.6	352.25	47.72
22B	59.77	12223.26	349.74	46.41

Tabla 4-26. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 21B y 22B.

#### 4.3.2.5 Tracción hasta el 50% de la carga de rotura

Hasta el 50% de la tensión media de rotura se ensayaron 5 probetas de cada panel.

##### 4.3.2.5.1 Resultados obtenidos para el Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .

En la tabla 4-27 se recogen las dimensiones principales de las probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
11A	15.01	1.54	23.11
12A	15.03	1.55	23.29
13A	15	1.55	23.25
14A	14.98	1.54	23.07
15A	15.02	1.55	23.28

Tabla 4-27. Dimensiones de las probetas del Panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 50% de la tensión media de rotura.

En el gráfico 4-15 se muestran las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de los ensayos que nos ocupan en el presente apartado. Se observa que las curvas ya no se ajustan tan bien unas a otras como en gráficas anteriores, ni siquiera para bajos niveles de carga. Hay que tener en cuenta que al ser los ensayos cada vez más breves y presentar los ejes cada vez una escala menor las curvas se ven más ampliadas y se observan más las diferencias. Si se calcula la diferencia de deformación máxima para un mismo nivel de tensión se ve que esta es de 0.099%, que está dentro de lo observado anteriormente.



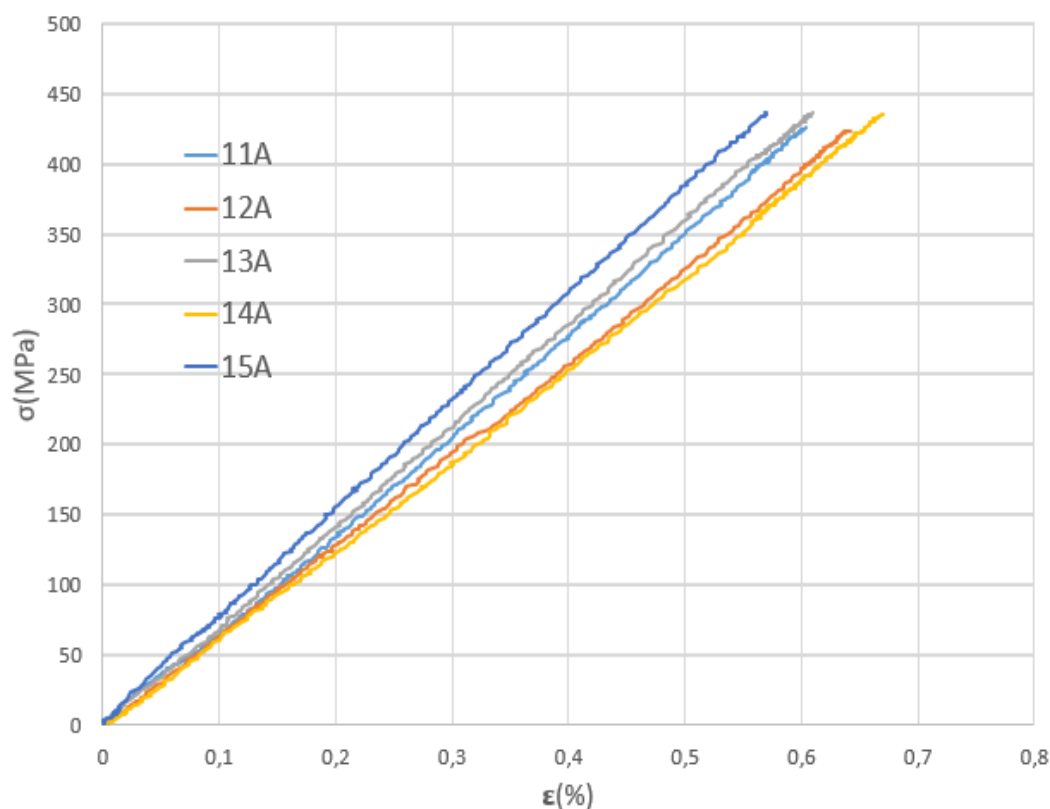


Gráfico 4-16. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 50% de la carga de rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

Al igual que para el resto de ensayos, en la tabla 4-28 se exponen los valores de porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza, tensión máxima y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	E(GPa)
11A	48.89	9839.43	425.76	70.69
12A	48.66	9868.86	423.74	64.78
13A	50.1	10143.54	436.28	72.8
14A	49.9	10025.82	434.58	63.71
15A	50.13	10163.16	436.56	77.6

Tabla 4-28. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 11a 15A.

#### 4.3.2.5.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

Los datos geométricos de las probetas del panel B ensayadas al 50% aparecen en la tabla 4-29.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
11B	15.08	2.26	34.074
12B	15.08	2.26	34.08
13B	15.01	2.24	33.93
14B	15	2.25	33.75
15B	14.68	2.26	33.15

Tabla 4-29. Dimensiones de las probetas del Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 50% de la tensión media de rotura.

En el gráfico 4-17 se puede ver el diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  que ha descrito cada una de las probetas al ser ensayada. Se observa que, a pesar de que a bajos niveles de carga se ajustan bastante bien en la escala del gráfico, conforme la carga aumenta se aprecian ligeras variaciones de la pendiente dentro de cada curva, que hacen que se alejen, y, que incluso se crucen.

A pesar de las distintas pendientes que se observan en estas curvas, las variaciones entran dentro de lo observado hasta ahora. La diferencia de deformación máxima para un mismo nivel de tensión es de 0.056%, lo cual está en el rango visto.

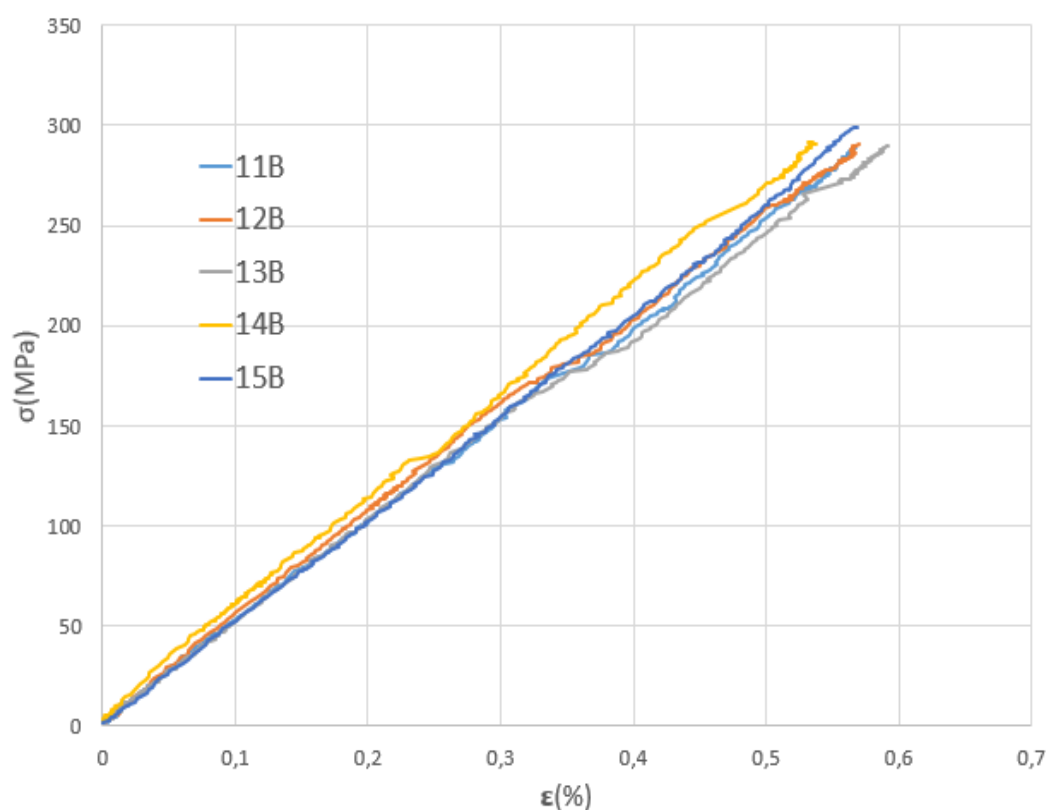


Gráfico 4-17. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 50% de la carga de rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
11B	49.35	9839.43	288.8	50.7
12B	49.63	9898.29	290.44	52.45
13B	49.56	9839.43	289.99	46.57
14B	49.87	9849.24	291.83	50.84
15B	51.12	9917.91	299.18	48.41

Tabla 4-30. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 11-15B.

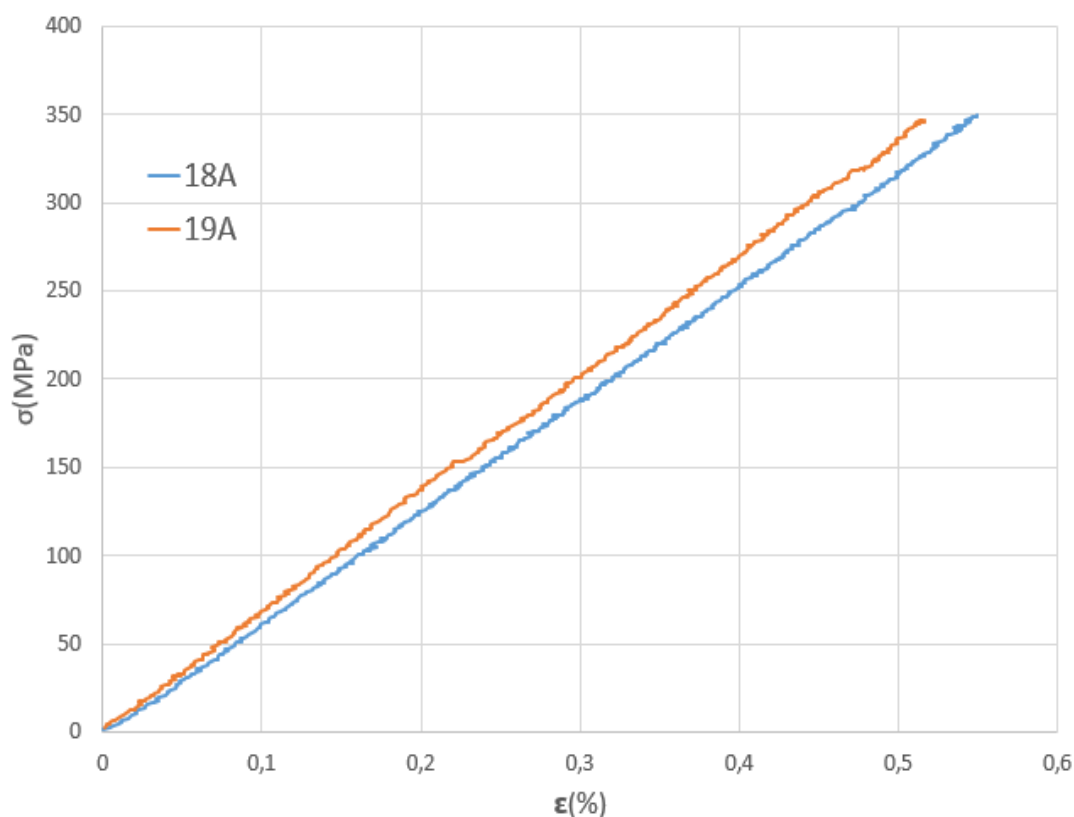
#### 4.3.2.6 Tracción hasta el 40% de la carga de rotura

Hasta el 40% de la tensión media de rotura se ensayaron 2 probetas de cada panel.

##### 4.3.2.6.1 Resultados obtenidos para el Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .

Las dimensiones de la sección de cada una de las probetas del panel A ensayadas al 40% de la carga de rotura se recogen en la tabla 4-31.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
18A	15.05	1.59	23.93
19A	15.01	1.53	22.96

Tabla 4-31. Dimensiones de las probetas del Panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 40% de la tensión de rotura.Gráfico 4-18. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 40% de la carga de rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

Las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de estas muestras se recogen en el gráfico 4-18. Tal y como se ha comentado anteriormente, se aprecia que las curvas no se ajustan tan bien a bajos niveles de carga como parecía en los ensayos al 80% o 70% de la carga de rotura, pero esto es debido al cambio de escala de los ejes. Si se calcula el error absoluto máximo comentado en la deformación para un mismo nivel de tensión se ve que este es de 0.03%, luego se sigue ajustando mejor que para las curvas con altos niveles de carga.

En la tabla 4-32 aparecen los datos numéricos correspondientes al porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas las probetas, los valores de fuerza, tensión máxima al y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
18A	40.17	8370.87	349.81	63.7
19A	40.08	8014.77	349.07	67.14

Tabla 4-32. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 18A y 19A.

#### 4.3.2.6.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

Las probetas ensayadas al 40% de la carga de rotura en el panel B han sido las numeradas como 18 y 19B. Sus dimensiones se recogen en la tabla 4-33.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
18B	15.12	2.3	34.78
19B	15.04	2.27	34.14

Tabla 4-33. Dimensiones de las probetas del Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 40% de la tensión media de rotura.

En el diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  correspondiente a estas muestras se ve que ambas se ajustan casi a la perfección teniendo un módulo elástico muy similar.

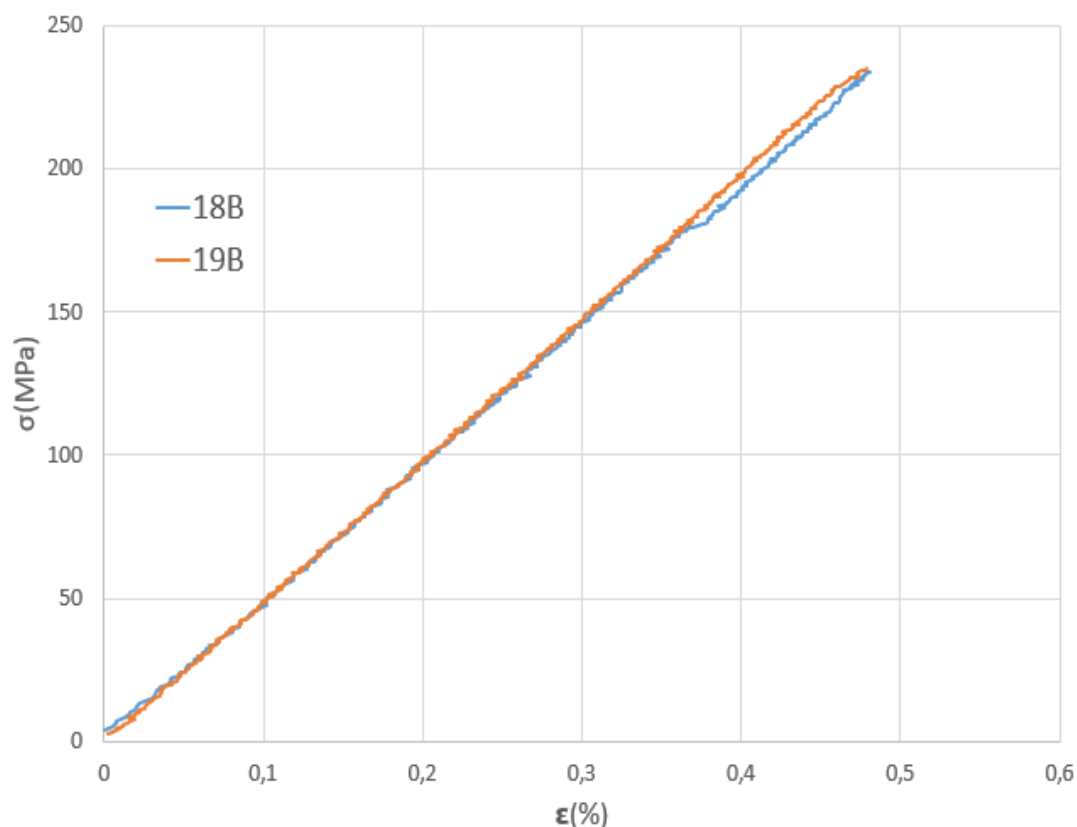


Gráfico 4-19. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 40% de la carga de rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

En la tabla 4-34 se dan los datos de porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza y tensión máxima y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	E(GPa)
18B	40.37	8216.86	236.25	48.82
19B	40.16	8022.62	234.99	49.64

Tabla 4-34. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 18B y 19B.

#### 4.3.2.7 Tracción hasta el 30% de la carga de rotura

Hasta el 30% de la tensión media de rotura se ensayaron 2 probetas de cada panel.

##### 4.3.2.7.1 Resultados obtenidos para el Panel A, $[0_2, 90_2]_S$ .

En la tabla 4-35 aparecen las dimensiones de las probetas 18 y 19A, cargadas al 30% de la tensión media de rotura.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
16A	14.97	1.57	23.5
17A	14.89	1.54	22.93

Tabla 4-35. Dimensiones de las probetas del Panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , ensayada al 30% de la tensión de rotura.

La gráfica 4-20 representa el diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  de estas muestras. Se ve que ambas gráficas se ajustan bastante bien. Para tener una idea numérica de esto basta con comparar el valor del módulo de Young, así como la diferencia máxima en deformaciones para una misma tensión, que en este caso es de 0.012%.

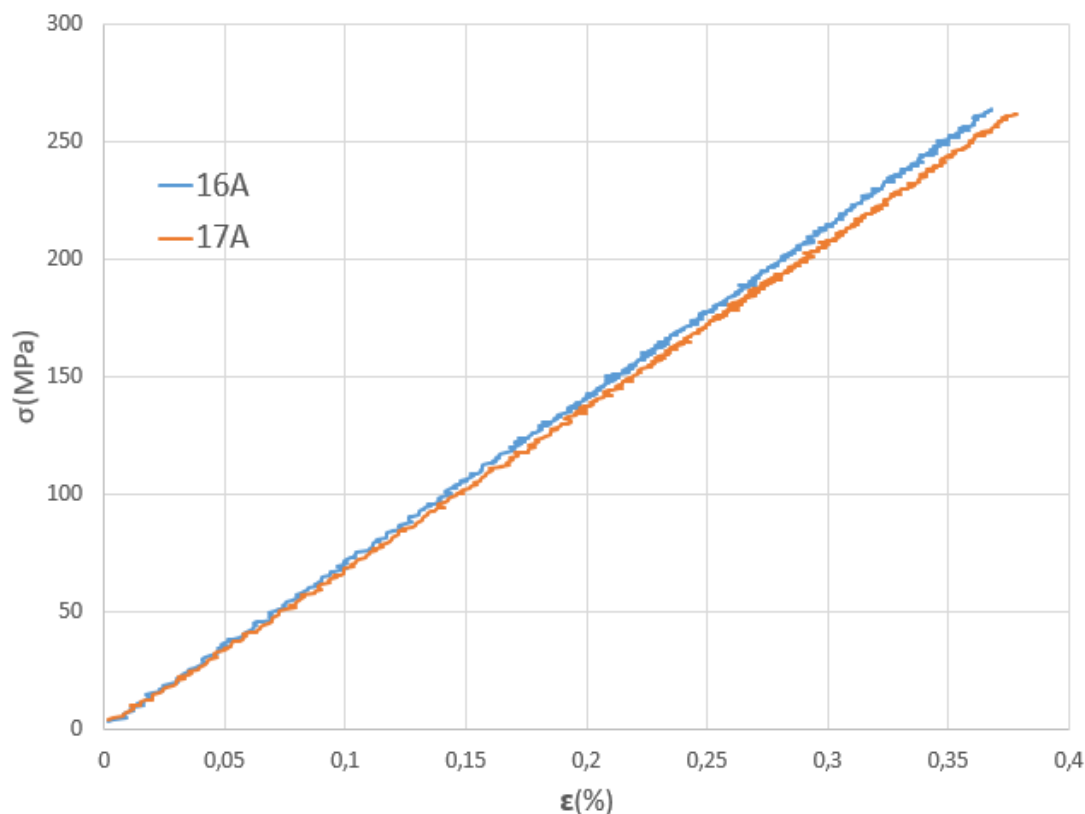


Gráfico 4-20. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 40% de la carga de rotura del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

En la tabla 4-36 aparecen los datos tanto de módulo elástico, como de valores máximos de fuerza y tensión que han soportado las probetas, así como el porcentaje de la tensión media de rotura que esta supone.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	E(GPa)
16A	30.27	6194.03	263.58	72.53
17A	30.05	6000.78	261.7	69.27

Tabla 4-36. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 16A y 17A.

#### 4.3.2.7.2 Resultados obtenidos para el Panel B, $[0_2, 90_4]_S$ .

Las probetas ensayadas al 30% de la carga de rotura en el panel B han sido la 16 y 17B. Sus dimensiones se recogen en la tabla 4-37.

Probeta	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
16B	14.98	2.33	34.9
17B	15.01	2.27	34.07

Tabla 4-37. Dimensiones de las probetas del Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , ensayada al 30% de la tensión media de rotura.

El diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  de las probetas ensayadas, recogido en el gráfico 4-21, muestra que estas se ajustan bastante bien una sobre otra, habiéndose detenido en ambos casos el ensayo para prácticamente la misma carga y siendo la diferencia máxima en deformación para un mismo nivel de carga de 0.03%.

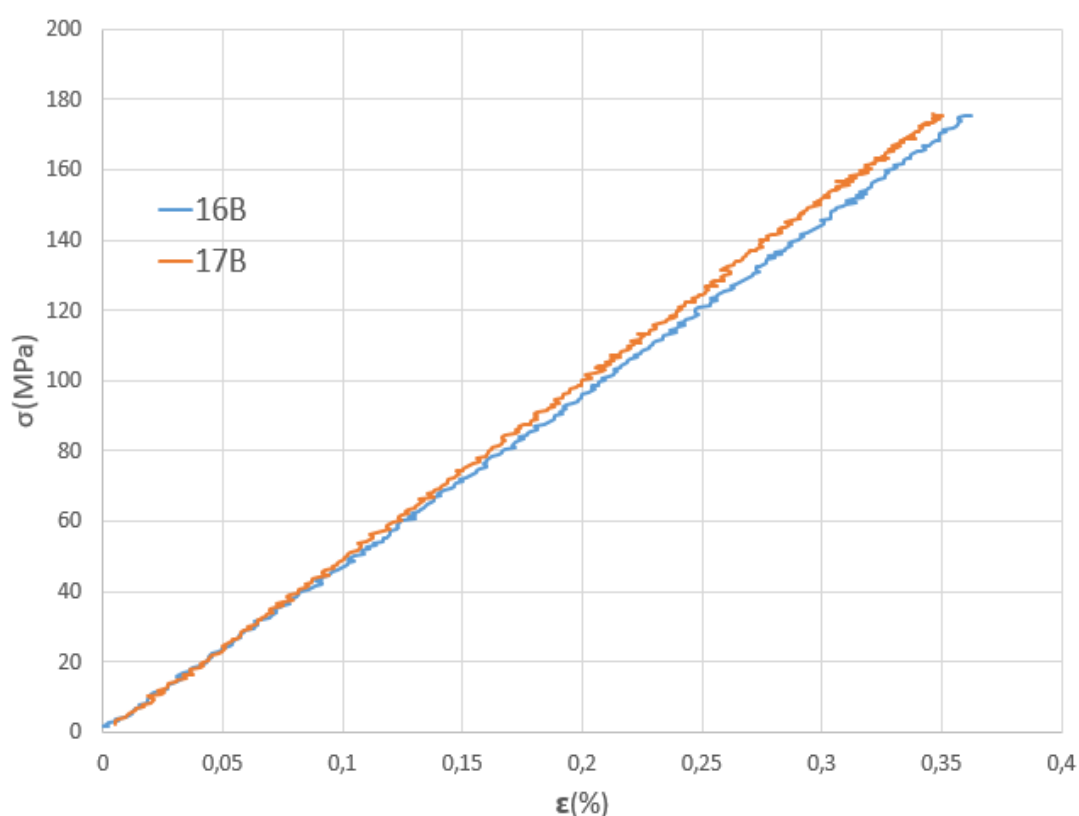


Gráfico 4-21. Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para el ensayo al 30% de la carga de rotura del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$

En la tabla 4-38 se dan los datos de porcentaje real de la tensión de rotura del laminado al que han sido ensayadas, los valores de fuerza y tensión máxima y el módulo de Young.

Probeta	%X (%)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	E(GPa)
16B	30.02	6131.25	175.68	48.67
17B	30.04	5989	175.78	51.42

Tabla 4-38. Fuerza máxima, tensión máxima y módulo Young de las probetas 16B y 17B.

4.3.3 Resultados extraídos de todas las muestras

Tal y como se ha comentado, para determinar la resistencia de cada laminado solo se pueden tener en cuenta aquellas probetas llevadas a la rotura, pero no es así en el cálculo de la rigidez. El comportamiento elástico lineal de los ensayos hace que este se pueda estimar como la media de todas las muestras ensayadas, pudiendo obtener por tanto un resultado más preciso. En el gráfico 4-22 aparece una representación del valor obtenido para todas y cada una de las muestras del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y a continuación, se recogen los datos numéricos derivados de él, es decir, valor medio, desviación típica, coeficiente de variación y errores relativos del valor máximo ( $\varepsilon_{R_{m\acute{a}x}}$ ) y mínimo ( $\varepsilon_{R_{m\acute{i}n}}$ ) obtenidos respecto del valor medio calculado.

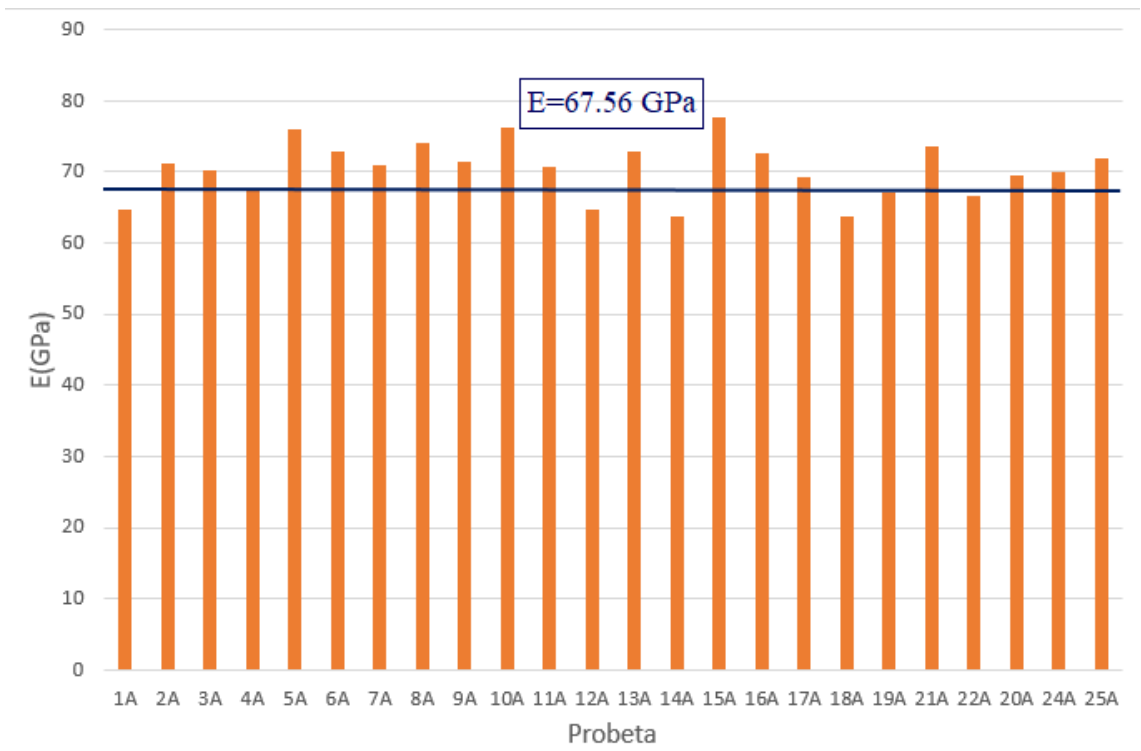


Gráfico 4-22. Rigidez de cada muestra del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y valor medio.

Rigidez	
Valor medio	67.56 GPa
Desviación típica	4.85 GPa
Coeficiente de variación	7.18%
Valor máximo	77.6 GPa
Valor mínimo	63.7 GPa
$\varepsilon_{R_{m\acute{a}x}}$	14.86%
$\varepsilon_{R_{m\acute{i}n}}$	5.71%

Tabla 4-39. Características de rigidez del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .



A continuación, se realizan las mismas representaciones para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

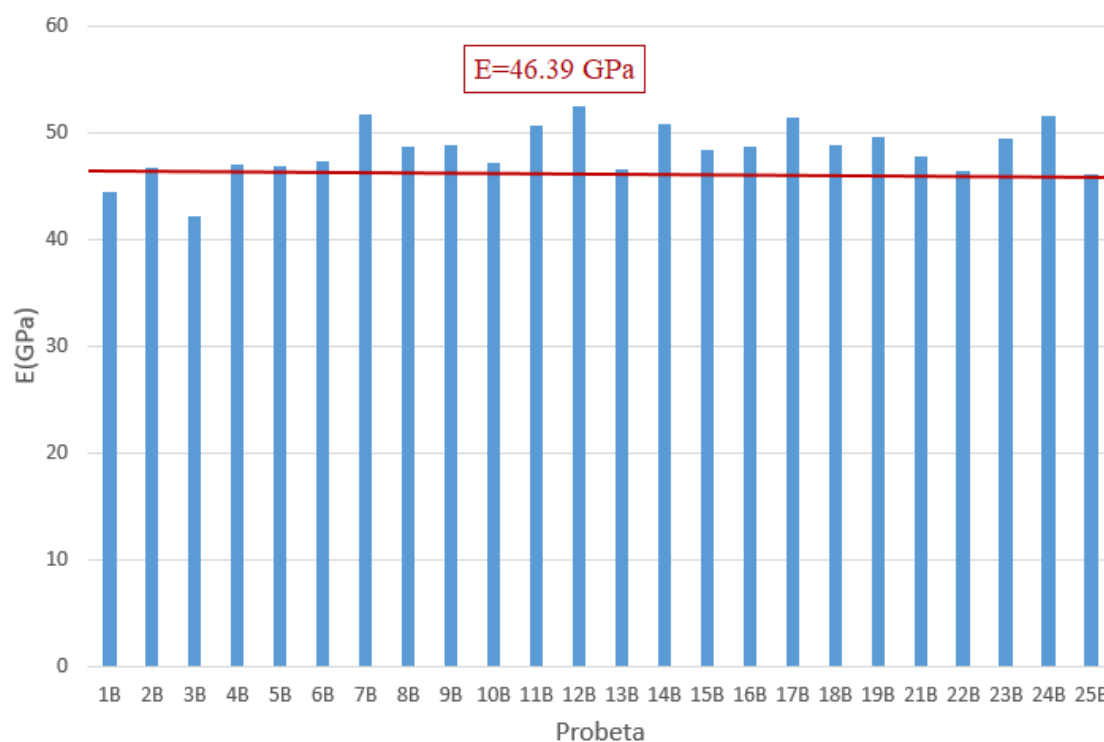


Gráfico 4-23. Rigidez de cada muestra del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , y valor medio.

Rigidez	
Valor medio	46.39 GPa
Desviación típica	3.15 GPa
Coefficiente de variación	6.78%
Valor máximo	52.45 GPa
Valor mínimo	42.15 GPa
$\varepsilon_{R_{máx}}$	13.06%
$\varepsilon_{R_{min}}$	9.13%

Tabla 4-40. Características de rigidez del panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Al igual que sucedía al comparar los datos obtenidos para la resistencia de cada panel, se ve que la dispersión de los resultados es mayor en el panel A que en el B, y que no existe una gran variación de los resultados respecto a lo obtenido para la rotura.



## 5 PREPARACIÓN E INSPECCIÓN DE MUESTRAS

Una vez ensayadas una serie de probetas de cada laminado a un porcentaje determinado de la tensión de rotura media calculada, el siguiente paso será en análisis del daño generado. Por ello, se procederá a la observación microscópica, que nos permitirá conocer la estructura interna del material y los fallos presentes tras la aplicación de la carga.

En este capítulo se describe tanto el proceso de preparación de las muestras para poder ser observadas al microscopio, así como el tratamiento posterior de las imágenes obtenidas.

### 5.1 Preparación de muestras para la inspección

El proceso de preparación de muestras se basa en dos pasos esenciales. Por un lado, en el encapsulado de las muestras, que consiste en introducir las probetas en una resina acrílica para embutición en frío y, por otro, en el lijado y pulido de la muestra con el objetivo de que la cara a inspeccionar cuente con una superficie que permita reflejar la luz del microscopio de forma perpendicular y se pueda observar la imagen. A continuación, se describen los equipos y máquinas usados en cada uno de estos procesos y se describen en detalle.

#### 5.1.1 Encapsulado de las probetas

##### 5.1.1.1 Materiales y equipos

El proceso de encapsulado necesita de los siguientes materiales y utensilios:

- **Máquina de corte de disco de diamante.** Esta máquina es la misma usada en el corte y resanado de las probetas, así como en la obtención de las probetas.
- **Clips de sujeción:** clips para la sujeción de las muestras. Se han empleado dos tipos, que se verán en las fotocoposiciones realizadas: clips metálicos y clips de plástico.
- **Kit VersoCit-2:** Se trata de un polvo y un líquido cuya mezcla produce una resina acrílica que cuando se enfría adquiere la forma del molde, facilitando la manipulación de las muestras.
- **Moldes FixiForm:** moldes de polipropileno cuya base es desmontable de 40 mm de diámetro.
- **Cuchara medidora:** permite obtener la cantidad óptima de VersoCit-2 Powder y VersoCit-2 Liquid para conseguir la correcta mezcla.
- **Vaso desechable:** recipiente de plástico donde se realiza la mezcla de polvo y líquido.
- **Mezclador desechable:** espátula de madera empleado en realizar la mezcla de polvo y líquido en el vaso desechable.
- **Acetona o Alcohol:** Empleados en la limpieza de los utensilios una vez terminado el proceso.
- **Guantes:** Necesarios para la manipulación de los productos.



Figura 5-1. Elementos necesarios para el encapsulado.

#### 5.1.1.2 Procedimiento experimental

El primer paso será cortar las probetas provenientes de los ensayos para que casen dentro del molde de encapsulado. En un primer momento se dividieron en 3 trozos, pero solo se realizaron así las muestras 6-7A, 6-7B, 11-12A y 11-12B. A partir de ahí se cortaron 4 trozos de la parte central para perder la menor información posible. Los pasos a seguir en el proceso de corte fueron, por un lado, marcar las probetas dividiéndolas en 4 trozos de dimensiones elegidas, referenciándolas, y por otro, el corte mediante la máquina de corte de disco de diamante, tal y como se muestra en la Figura 5-2.

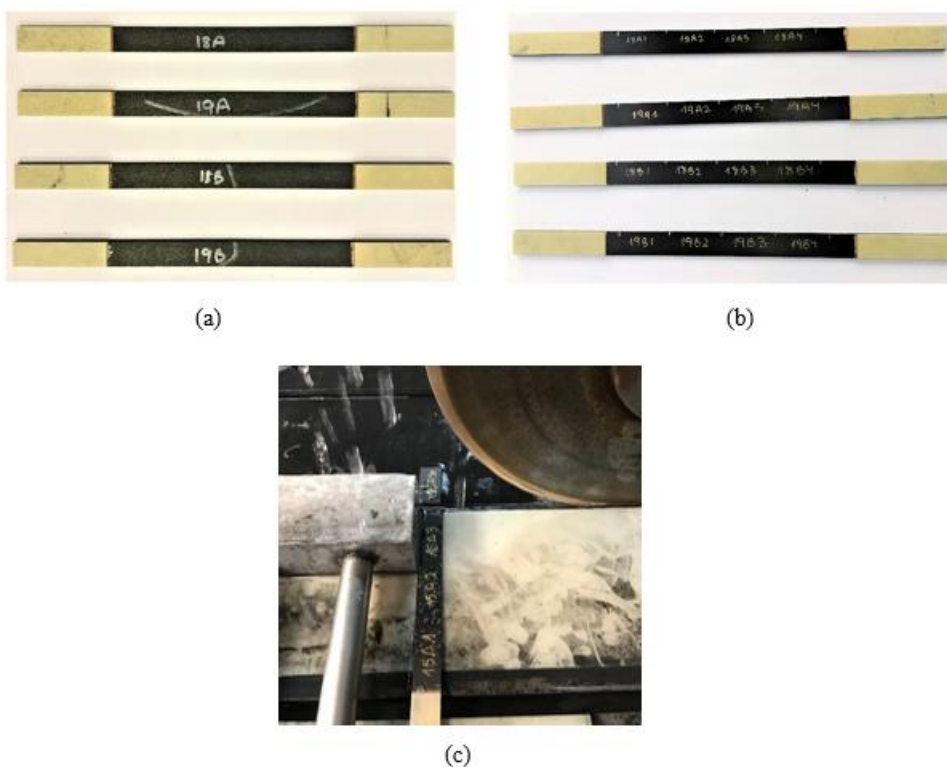


Figura 5-2. Probetas (a); Marcas de corte de las probetas (b); Corte de las probetas para encapsulado(c).

Con el objetivo perder la menor cantidad de probeta posible, en un primer momento las dimensiones escogidas para cada uno de los trozos rondaban los 35 mm, lo cual se aproxima al diámetro máximo de los moldes, de 40 mm. Sin embargo, al realizar el proceso de lijado y pulido se observó que, aunque en general era fácil obtener buenos resultados en la parte central de la muestra, en los extremos era más difícil eliminar los rayones y defectos de la resina, lo que hacía necesario que en algunas muestras se realizaran un mayor número de pulidos que en otras para obtener buenos resultados. Posteriormente, en el análisis de micrografías se observó el hecho de que para una misma carga y laminado, las macrogrietas tenían una mayor profundidad en las probetas a las que se habían aplicado un mayor ciclo de pulidos. La preocupación de que la capa de material eliminada en el proceso de lijado fuera tal que los resultados se pudieran ver modificados, se decidió, en adelante, aplicar un único proceso de lijado y pulido a las muestras y, así, comparar resultados en el mismo plano. Para obtener buenos resultados en un único pulido se acortó la longitud de cada uno de los 4 trozos en los que se cortaba una probeta a 25 mm. Este no fue el único cambio que se introdujo. En la sección 5.1.2 se describirán las distintas secuencias de pulido seguidas en la realización del presente proyecto y, más adelante, en el apartado 7.2 se estudiará con más detalle el posible efecto del pulido en los resultados.

Una vez se han dividido las probetas de tal modo que es posible introducirlas en el molde se procede al encapsulado. Este se ha realizado de tal modo que en cada molde se ha introducido una probeta. El objeto de análisis es el canto donde se mide el espesor de la probeta, es decir, donde se generan las grietas transversales a la dirección de aplicación de la carga y donde se puede observar la separación entre la fibra y la matriz. Se hace necesario, por tanto, que esta superficie se apoye de la forma más plana posible sobre el molde de embutición. Debido al poco espesor de la sección de las muestras obtenidas estas no se mantienen rectas en el interior del molde por sí solas, por lo que se usan los clips de sujeción, que ayudan a aumentar la superficie de apoyo.

El conjunto muestras-clips de sujeción se introducen en el interior de un molde de manera que quede lo más centrado posible. Las muestras se han ordenado en el interior del molde tal y como se han cortado, por lo que en las paredes exteriores del molde se mantiene la nomenclatura empleada en el corte para no perder la referencia que ayuda a saber que trozos han sido cortados de los extremos de una probeta y cuales de su parte central. La nomenclatura seguida ha sido *nº de probeta-panel de procedencia-posición*. En la Figura 5-3 se muestra el proceso para probetas cortadas en 3 trozos, donde para denominar la posición dentro de la probeta se han usado las siglas D (derecha), C (centro) e (I) izquierda. En las probetas cortadas en 4 trozos la posición se ha designado mediante números del 1 al 4.

Tras la correcta colocación de las muestras, se elabora la resina de las cápsulas. Para ello se procede mezclando en un vaso de mezcla dos partes del polvo del *kit Versocit-2, VersoCit-2 Powder*, por cada una de líquido, *VersoCit-2 Liquid*, mediante el uso de una cuchara medidora. Una vez realizada la mezcla se agita con una espátula de madera durante unos 30s y se procede al vertido en los moldes. No se puede dejar pasar demasiado tiempo antes del vertido pues la resina solidifica muy rápido impidiendo el traslado. En el traspaso de resina a los moldes hay que tener especial cuidado en que la inercia del líquido no desplace las muestras. Para conseguir esto, es conveniente realizar el trasvase en dos veces. La primera vez se vierte una cantidad de resina tal que no cubra del todo la muestra y permita su rápida recolocación, centrándola, y una vez que este primer vertido haya solidificado se completa el molde obteniendo la pastilla completa, dejando la mezcla secar al aire.

Aunque la solidificación suele ser muy rápida, no hay un tiempo exacto, pues depende de la proporción exacta líquido-polvo y de las condiciones del ambiente donde se deja secar. Para la extracción de las muestras del molde es conveniente esperar un intervalo de tiempo de unas 2 horas para asegurar que están completamente secas y no habrá problemas en el proceso de lijado y pulido. En el proceso de extracción se ha tenido especial cuidado en transpasar correctamente la nomenclatura del molde a la muestra.

Para terminar, se limpia con acetona la cuchara medidora y cada uno de los moldes, así como las superficies de trabajo.

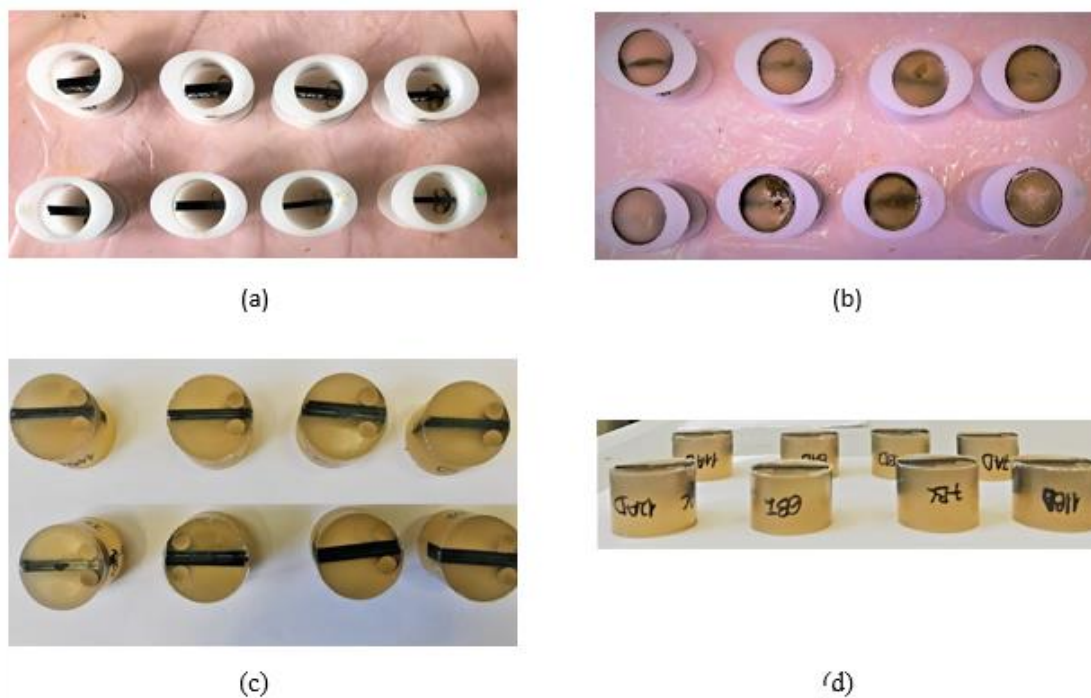


Figura 5-3. Colocación de muestras en el molde de encapsulado (a); Vertido de la resina (b); Desmoldeo (c); Nomenclatura en las muestras (d).

## 5.1.2 Lijado y pulido de muestras

### 5.1.2.1 Materiales y equipos

Para realizar el pulido y lijado de las muestras se procede de la misma manera, variando únicamente el grano el paño empleado. Los equipos usados son los mostrados en la Figura 5-5:

- **Máquina programable de lijado y pulido *Saphir 520*:** permite el lijado y pulido simultáneo de hasta cinco muestras. Consta de una pantalla LCD para su manejo que permite programar tiempo, fuerza, velocidad, así como el sentido de giro del cabezal, entre otras opciones; base magnética; plato de 250 mm de diámetro colocado sobre dicha base; grifo extraíble para la refrigeración con agua y limpieza del plato; porta-muestras para cinco muestras de 40 mm de diámetro con adaptadores a un tamaño menor; inyectores para líquidos lubricantes. En concreto, este modelo pertenece al fabricante *NEURTEK Instrumentes*.



Figura 5-4. Pantalla LCD de la máquina programable *Saphir 520*.

- **Sistema de dosificación automático *LaboDoser* de *Struers*:** permite el suministro continuo y uniforme, de forma automática, de las soluciones de diamante empleadas durante el proceso de pulido.
- **Pulidora auxiliar *LaboPol-5* con cabezal *LaboForce-1* de *Struers*:** Necesaria para coordinar el sistema de dosificación con la pulidora principal. Permite programar el tiempo de dosificación del lubricante.



Figura 5-5. Equipo de lijado y pulido.

En cada fase del proceso se emplea un disco con una determinada superficie que determina si se trata de un proceso de lijado (eliminación de material para evitar posibles rayones y marcas profundas anteriores) o pulido (superficie de espejo). Los discos son de 250 mm, al igual que el soporte de la lijadora, y se emplea cada uno junto a su líquido correspondiente, formado por una suspensión estable de base acuosa, que contiene una mezcla de diamantes de alto rendimiento y lubricante refrigerante. A continuación, se detallan cada uno de los paños empleados en las muestras bajo estudio.

- **Papel de lija para pulidora *SiC#320*:** el número indica el tamaño de grano de la lija de 320  $\mu\text{m}$ .
- **Disco *MD-Largo 9  $\mu\text{m}$* :** disco con fijación magnética que posee incrustaciones de diamante para un paso de molienda fina en materiales con dureza 40-150 HV.
- **Disco *MD-Dac*:** paño de pulido para todo tipo de materiales, fabricado con un tejido satinado de acetato. Su rango abrasivo es 9-3  $\mu\text{m}$ , y tiene dureza y resiliencia media. Está provisto de fijación magnética.
- **Disco *MD-Nap*:** paño de pulido para todo tipo de materiales, fabricado con pelo sintético corto. Su rango abrasivo inferior a 1  $\mu\text{m}$ , su resiliencia muy alta y su dureza muy baja. Posee fijación magnética.
- **Líquido *DiaPro Allegro/Largo 9  $\mu\text{m}$* :** para un alto rendimiento en el uso del disco *MD-Largo*.
- **Líquido *DiaPro Dac 3  $\mu\text{m}$* :** para pulido metalográfico de alto rendimiento y correcto nivel de lubricación con el disco *MD-Dac*.
- **Líquido *DiaPro Nap B1 1  $\mu\text{m}$* :** para pulido de alto rendimiento de materiales duros ( $\text{HV} > 150$ ) usando el disco *MD-Nap*.



### 5.1.2.2 Procedimiento experimental

El proceso a seguir se ha variado ligeramente en el transcurso del trabajo, siendo añadidos y eliminados pasos según se ha considerado mejor para llegar a los resultados deseados. En un primer momento, el proceso constaba de 4 partes que se basan en la utilización de cada uno de los paños descritos. La evolución seguida por cada una de las partes del proceso se detalla a continuación.

- **Paso 1: Lijado vasto o Lijado plano**

En primer lugar, se coloca la lija de *Carburo de Silicio 320*, *SiC #320*, sobre un soporte cuyo nombre dado por el fabricante es *MD Gekko*, pues esta lija carece de sujeción magnética, y, éste, sobre el plato de la máquina. Se abre el grifo de agua y se emplea la manguera extensible para lubricar la lija para cubrir toda la superficie del disco. A continuación, se baja el cabezal y se introducen las muestras, colocando hacia abajo la cara más plana, correspondiente a la superficie a inspeccionar. Se baja la palanca situada a la derecha de la pulidora para fijar el cabezal y se programan los parámetros de la pulidora, empleando los botones inferiores de la pantalla para seleccionar cada uno de ellos y la rueda de la derecha para seleccionar el valor.

Se han empleado dos ciclos diferentes de este paso. El ciclo seguido en las primeras probetas, las cuales se corresponden con las ensayadas al 50 y 80% de la tensión media de rotura de cada panel, era de un tiempo de 4 minutos, 40N de fuerza vertical hacia abajo y velocidad de giro de 80 u/min. Al observar en la inspección de estas probetas que había ocasiones en que un nuevo proceso de lijado y pulido podía traer consigo más rayones y defectos en lugar de una mejora de la superficie a analizar se decidió modificar este paso. El ciclo seguido en resto de muestras fue, por tanto, de un tiempo de 3 minutos, 35N de fuerza vertical hacia abajo y velocidad de giro de 80 u/min.

Para refrigerar, la máquina irá vertiendo agua durante el lijado. Una vez finalizado el lijado, se levanta nuevamente la palanca, se eleva el cabezal y se retiran las muestras. Antes de iniciar el siguiente paso se extrae el conjunto lija- plato *MD Gekko* y se seca muy bien el soporte para garantizar la adhesión de la siguiente lija.



Figura 5-6. Lija *SiC #320* y soporte *MD Gekko* (a); Lijado plano (b).



- **Paso 2: Lijado fino**

Se usa el paño de tamaño de partícula  $9\text{ }\mu\text{m}$  que se coloca en el plato de la máquina. Antes de empezar con el proceso de lijado «fino» se lubrica el paño con su líquido correspondiente a través de los inyectores con los que cuenta la máquina. Se colocan de nuevo las muestras y se procede al lijado vertiendo el líquido mencionado durante el proceso. En el paso de un ciclo de pulido a otro, este paso ha sido el que ha sufrido menos variaciones. Se ha realizado en todo momento en un tiempo de 6 minutos y a una velocidad de giro de  $80\text{ u/min}$ , variando únicamente la fuerza de  $40\text{ N}$  a  $35\text{ N}$ . Pasado el tiempo de lijado, se retiran las muestras que han de ser enjuagadas con agua, y se retira el paño, que también debe ser enjuagado con agua.

- **Paso 3: Pulido de  $3\text{ }\mu\text{m}$**

Se utiliza el paño de diamante de  $3\text{ }\mu\text{m}$ , con su líquido correspondiente. El tiempo empleado es de  $5\text{ min}$ , con una fuerza sobre el disco de  $40\text{ N}$  y una velocidad de giro de  $80\text{ u/min}$ . Transcurrido ese tiempo, se retiran las muestras que se deben limpiar con agua y se retira el paño, que también debe limpiarse con agua. Este paso solo se empleo en las primeras muestras, siendo posteriormente eliminado y compensado aumentando el tiempo de pulido a  $1\text{ }\mu\text{m}$ .

- **Paso 4: Pulido fino**

Con el objetivo de darle un mejor acabado a las muestras, se realiza el llamado *pulido fino*, con un paño de  $1\text{ }\mu\text{m}$ . El proceso de preparación es idéntico al seguido en los dos casos anteriores. En el pulido de las primeras muestras que se trataron el ciclo seguido fue: un tiempo de  $4\text{ min}$ , fuerza sobre el disco de  $35\text{ N}$  y velocidad de giro de  $80\text{ u/min}$ . Posteriormente, con el objetivo de conseguir un mejor acabado y de sustituir la eliminación del paño de  $3\text{ }\mu\text{m}$  se introdujeron una serie cambios. En primer lugar, se dividió el proceso en dos, de las mismas características, pero variando el sentido de giro las muestras. A continuación, se variaron las características del ciclo. El proceso seguido en cada sentido fue de un tiempo de  $5\text{ minutos}$ , fuerza vertical de  $25\text{ N}$  y velocidad de giro de  $80\text{ u/min}$ . Para variar el sentido de giro se debe seleccionar la opción colocando el marcador encima mediante las flechas del panel y girar la rueda. En la Figura 5-7 aparece el sentido normal de giro de las muestras y el cambio introducido.

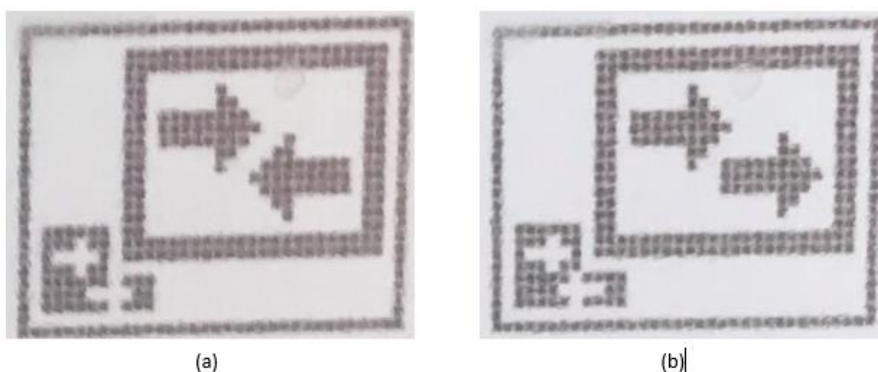


Figura 5-7. Sentido normal de giro del cabezal de la pulidora(a); Sentido contrario(b)

En la tabla 5-1 aparece un resumen de cada uno de los ciclos seguidos.

Especificación			Ciclo 1			Ciclo 2		
Paso	Disco	Líquido	Tiempo	Presión	Velocidad	Tiempo	Presión	Velocidad
1	<i>Lija SiC #320</i>	Agua	4 min	40 N	80 u/min	3 min	35 N	80 u/min
2	<i>MD-Largo</i>	<i>DiaPro Largo 9 μm</i>	6 min	40 N	80 u/min	6 min	35 N	80 u/min
3	<i>MD-Dac</i>	<i>DiaPro Dac 3 μm</i>	5 min	40 N	80 u/min	-	-	-
4	<i>MD-Nap</i>	<i>DiaPro Nap B1 1 μm</i>	4 min	35 N	80 u/min	5 - 5 min	25 N	80 u/min

Tabla 5-1. Resumen del proceso de pulido.

## 5.2 Inspección al microscopio

Con las muestras ya lijadas y pulidas, estas están listas para ser observadas al microscopio. Dicha observación se realizarán a distintos aumentos, que van desde x2.5 a x1000. Para la visualización de la sección bajo estudio el microscopio cuenta con una cámara digital que está conectada simultáneamente a el microscopio y al ordenador, permitiendo ver las imágenes directamente a través de este. En esta sección se indican los equipos y software empleados, así como el procedimiento seguido para la obtención de las imágenes finales que aparecen en el presente Proyecto.

### 5.2.1 Equipos y software

- **Microscopio Binocular Invertido modelo EPIPHOT 200:** permite observar muestras con diferentes aumentos, como son: 2.5x, 5x, 10x, 20x, x50, 100x.
- **Cámara Infinity 1-3C-NS:** cámara fotográfica CCD especial para microscopía.
- **Adaptador Tv lens C-0.45x:** permite conectar el microscopio con la cámara.
- **Programa para microscopía Perfect Image V8.01:** permite ver en tiempo real lo visionado a través del microscopio.

### 5.2.2 Inspección de muestras y captura de imágenes

El primer paso a seguir una vez las muestras han sido pulidas es proceder a su limpieza para eliminar restos de partículas que pueden estropear las imágenes obtenidas (polvo, restos del pulido...). Para hacerlo se introducen las muestras bajo un chorro de agua durante unos segundos y, posteriormente, se secan con un algodón o papel suave teniendo especial cuidado en no rayar la superficie pulida, además de evitar dejar restos de agua o algodón.

Una vez preparadas las muestras, se procede al encendido de los equipos, es decir, microscopio y ordenador. A continuación, se procede a la apertura del programa y se coloca la muestra en la pletina del microscopio. El portaobjetivos, donde están enroscadas las lentes, permite con un pequeño giro seleccionar la lente deseada. Para centrar la muestra se ha procedido siempre escogiendo en primer lugar el menor aumento, es decir, el que se indica como de 2.5x, y a continuación se ha ido aumentando hasta el nivel deseado. A la hora de elegir el aumento se ha de tener en cuenta que la imagen sufre un aumento de la cantidad que indica la lente por diez. Es decir, si indica 2.5, el aumento es de 25, y así sucesivamente. En lo sucesivo se empleará la nomenclatura x25, x50, x100, x200, x500 y x1000 para indicar a cuantos aumentos se ha realizado una imagen.

La muestra puede ser observada de dos formas: a través de los oculares del microscopio o mediante el programa de adquisición del ordenador. Al ser el objetivo obtener imágenes con las que poder comentar lo observado, se ha realizado un análisis mediante las imágenes mostradas en pantalla, enfocando para alcanzar en estas la mayor calidad posible. Para enfocar se hace girar una de las ruedas de enfoque del microscopio: la rueda interior para un primer enfoque macromético, y la exterior, más pequeña, para un enfoque más fino. Para obtener una mayor calidad de imagen se juega también con la luz, girando la rueda para regular la intensidad de la fuente de luz. A la hora de enfocar se ha procedido del mismo modo que para alinear la probeta, es decir, se ha enfocado en pocos aumentos para localizar la zona y se ha ido aumentando poco a poco.

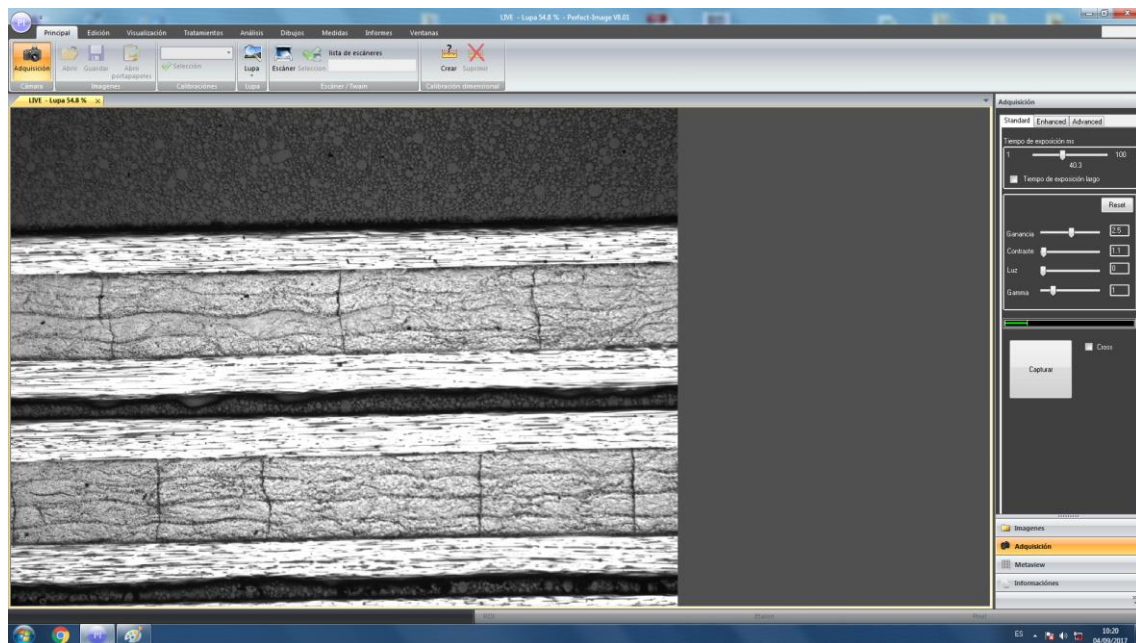


Figura 5-8. Visualización de una muestra en el *Perfect Image*.

La imagen puede variar en tonos de luz y color, por lo que para que las distintas capturas realizadas tengan características homogéneas de luz y color se ha decidido realizar micrografías en blanco y negro. Una vez se ha obtenido la calidad de imagen deseada, se recorren las muestras y, cada vez que se desee realizar una fotografía no hay más que pulsar en el icono de capturar, teniendo especial cuidado en que el programa se encuentre en el modo adquisición. La imagen tomada aparecerá en el margen derecho en la pestaña *Imágenes*. Es importante guardar cada pocas fotos para evitar perder las fotos realizadas si el programa realiza un cierre inesperado. Además, el programa no es capaz de tener un gran número de fotos en la pestaña *Imágenes* y hay un momento en que deja de guardar fotos. Lo más aconsejable es realizar un guardado de las imágenes realizadas cada 10 fotos aproximadamente, y reiniciar el programa si se llegan a las 40.

Una de las opciones que tiene el programa *Perfect Image* es hacer fotocomposiciones, es decir, hace que a pesar de que los aumentos del microscopio no me permiten ver la probeta entera, se puedan realizar una serie de fotos y montarlas en una sola. Esta opción será muy útil, pues permitirá ver en una única imagen toda la probeta y observar los daños más visibles, como las macrogrietas. Para realizar las fotocomposiciones se ha procedido recorriendo la probeta de arriba a abajo, de izquierda a derecha y de abajo a arriba. Al pasar de una imagen a otra es necesario fijarse en un punto de referencia que permita realizar la siguiente imagen en el punto donde se dejó la anterior sin perder información.

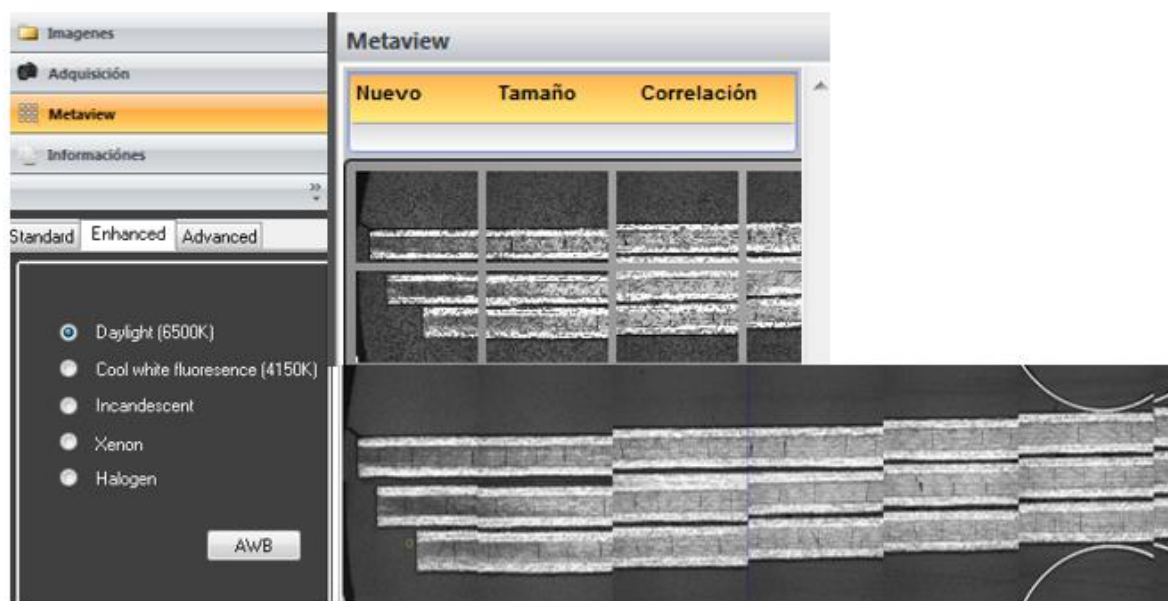


Figura 5-9. Esquema del procedimiento para realizar una fotocomposición.

Una vez realizadas las fotografías se procede al montaje de la fotocomposición. Se selecciona la pestaña *Metaview* en la parte derecha → *Tamaño* →  $8 \times 8$ . Seleccionando cada imagen y pulsando la tecla *Ctrl*, se arrastran una por una y por orden, a cada uno de los cuadros que aparecen en el margen derecho tras seleccionar el tamaño de la muestra. Seguidamente, se selecciona la opción *Correlación*, apareciendo una ventana donde se realiza el montaje de imágenes para conseguir la fotocomposición final. Una vez obtenida se pulsa el icono de una flecha hacia arriba y la imagen aparece montada en el programa principal como una imagen más tomada al microscopio y, por tanto, se ha de guardar como si de una de ellas se tratara.

Para poder identificar distancias en las fotos tomadas es conveniente adjuntar una escala. El primer paso a seguir para ello es seleccionar el aumento al que se han realizado la fotografía en la pestaña *Principal*. En esta opción permite elegir en que unidades se desea la escala. Al estar manejando distancias tan pequeñas las unidades elegidas van a ser micras. Posteriormente se selecciona en la pestaña *Dibujos* el icono de *Escala*, y se introduce la longitud de la escala.

Otra opción que se ha usado en el desarrollo del presente trabajo es la opción de insertar medidas. Para ello se ha de seleccionar, al igual que se hace para insertar la escala, el aumento al que se ha realizado la fotografía en la pestaña *Principal*. A continuación, se selecciona la pestaña *Medidas* el icono *Línea* y se realiza la medida. Se ha usado el icono *Línea* porque se van a introducir medidas horizontales.

En la exposición de los resultados de la inspección microscópica, se expone lo observado en el análisis al microscopio de las distintas probetas ensayadas, identificado los fallos observados y el nivel de carga para los que aparecen en cada laminado. Esto permitirá realizar una comparación de la evolución del daño sufrido en cada panel que ayude a establecer las posibles causas de que el laminado más delgado, denominado como panel A, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_S$ , aguantó una carga mayor que el laminado más grueso, denominado como panel B, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_S$ .

En el análisis de resultados se hará una diferenciación de dos tipos, identificando el primero de ellos como análisis de resultados a escala meso, y que se basará en el recuento de grietas e identificación del tipo de grietas que aparecen, a  $\times 25$ , y el segundo como análisis microscópico refiriéndose este al análisis en detalle de los fallos internos del laminado a nivel de matriz. Este segundo análisis incluye observaciones al microscopio que van de  $\times 200$  a  $\times 1000$ .

Como ya se comentó en el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos, se han ensayado números iguales de probetas de cada laminado al mismo porcentaje de su propia tensión de rotura media, obtenida experimentalmente. A la hora de comparar resultados entre los dos laminados se hará para cada uno de

estos porcentajes de carga, es decir, se comparará el daño sufrido por cada panel cuando estos están sometidos al mismo nivel de carga.

Las micrografías analizadas en el estudio del daño a x500 y x1000 aumentos han sido tratadas. Por un lado, enfocando la zona donde se produce el daño y, por otro, jugando con la luz para remarcar los defectos apreciados.



## 6 INSPECCIÓN MICROSCÓPICA: OBSERVACIONES A ESCALA MESO

El primer paso a seguir en la observación al microscopio fue la realización de fotocomposiciones, a x25 aumentos, de acuerdo con lo descrito en el apartado 5.2.2. En estas imágenes se pueden visualizar las macrogrietas, lo que permitirá, por un lado, realizar un estudio estadístico de la densidad de grietas transversales por unidad de longitud que aparece en cada una de las probetas para la aplicación de un determinado nivel de carga, y, por otro, clasificarlas. Estos serán los objetivos del presente capítulo, donde se observará como, sin adentrarse en un análisis profundo del daño interno a nivel de fibra y matriz, ya se observan importantes diferencias.

Cualitativamente parece obvio que a mayor valor de la tensión aplicada mayor será el deterioro del laminado. Sin embargo, aquí se pretende ir un poco más allá, realizando un análisis cuantitativo que permita determinar a gran escala qué cantidad de daño aparece para un determinado nivel de tensión, los distintos tipos que se observan y el ritmo de crecimiento del daño. Una vez analizado este efecto en cada panel se podrán realizar comparaciones entre ambos laminados y relacionarlos con su resistencia. En el capítulo 7 se intentará relacionar los resultados aquí obtenidos con lo observado a un mayor número de aumentos.

### 6.1 Densidad de grietas transversales

En esta sección se exponen las fotocomposiciones montadas y se realiza el recuento de grietas por unidad de longitud de cada una de las muestras. Se contabilizarán en el estudio las grietas transversales, es decir, aquellas que se extienden de lado a lado del laminado en la dirección perpendicular a la dirección de la carga, tal y como se aprecia en la Figura 6-1.

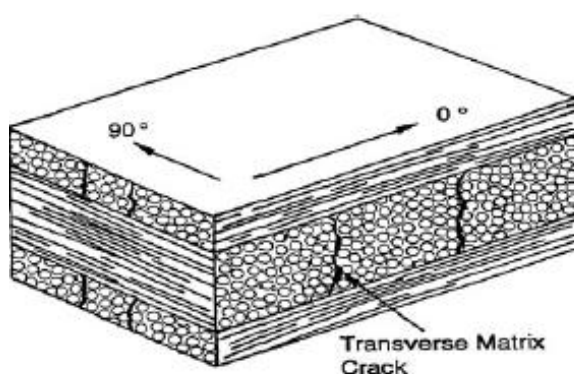


Figura 6-1. Grietas transversales en un laminado formado por laminas a 90° y 0° respecto a la dirección de aplicación de la carga.

Se procederá exponiendo los resultados obtenidos para cada panel, clasificando dentro de cada uno las muestras por nivel de carga aplicada, y, a continuación, se compararán los resultados obtenidos. Para calcular la densidad de grietas por unidad de longitud se mostrará la longitud de cada uno de los trozos en

los que se ha dividido la probeta, medidos con el software de laboratorio una vez realizada la fotocomposición, y, a continuación, se realizará el recuento de número de grietas por longitud. Se procederá de igual forma en el recuento de grietas de cada tipo. Estos cálculos aparecen recogidos con más detalle en el Anexos B y C.

A pesar de que la medida de la muestra se ha realizado en micras, debido a que al trabajar con distintos aumentos se desea tener siempre la misma medida a la hora de comparar distancias, la densidad de macrogrietas se presentará en número de macrogrietas por centímetro, con el objetivo de obtener una representación más visual.

### 6.1.1 Densidad de grietas transversales: Observaciones en el panel A, $[0_2, 90_2]_S$

#### 6.1.1.1 Probetas ensayadas hasta el 90% de la carga de rotura

Tal y como se ha comentado en el capítulo 4, al 90% de la carga de rotura se ensayó una única probeta, la 25A. Esta probeta fue encapsulada en 4 trozos. En la Figura 6-2 aparece la muestra a x25.

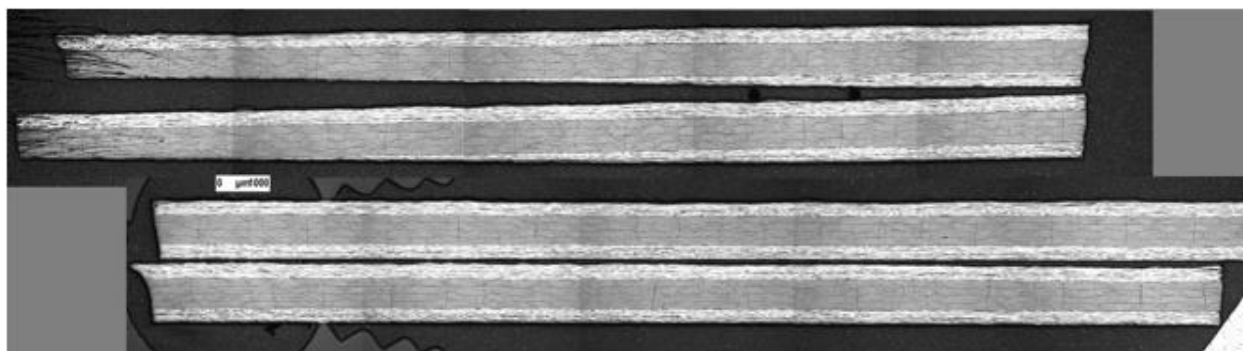


Figura 6-2. Fragmentos de la muestra 25A, observada a x25.

En la tabla 6-1 se exponen el valor de porcentaje de la tensión media de rotura, longitud total de la muestra, número de grietas contadas y densidad de grietas (en grietas por centímetro). Para visualizar con más detalle como se ha llegado a estos datos finales a partir de las medidas realizadas en cada trozo, estas se han descrito en el Anexo B.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
25A	89.996	10.4	81	7.78

Tabla 6-1. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel A, ensayo al 90%.

#### 6.1.1.2 Probetas ensayadas hasta el 80% de la carga de rotura

En las Figuras 6-3 a 6-7 se recogen las fotocomposiciones realizadas de las muestras 6 a 10A, ensayadas al 80% de la tensión media de rotura calculada para el panel A. En la tabla 6-2 se recoge la densidad de grietas obtenida para cada una de las muestras y, a continuación, se realiza el valor medio, útil para posteriores comparaciones basadas ya no en el resultado obtenido para cada muestra individual, si no en los resultados obtenidos para un porcentaje de carga.



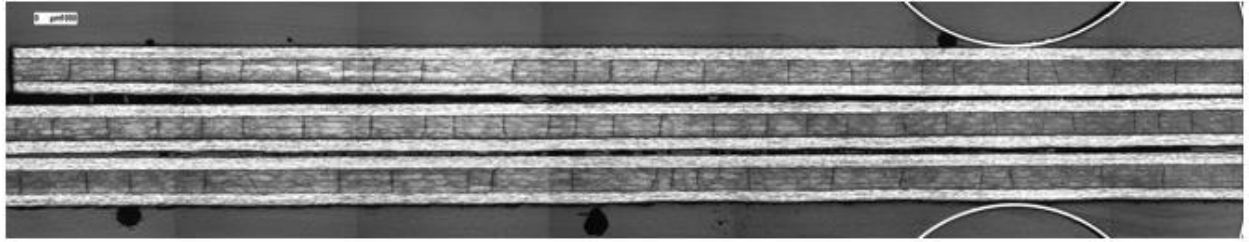


Figura 6-3. Fragmentos de la muestra 6A, observada a x25.

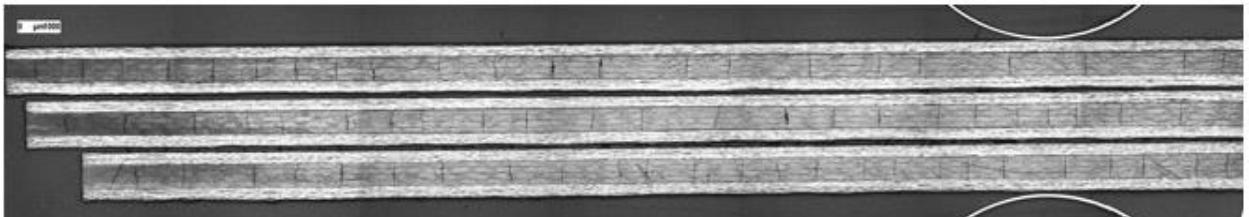


Figura 6-4. Fragmentos de la muestra 7A, observada a x25.

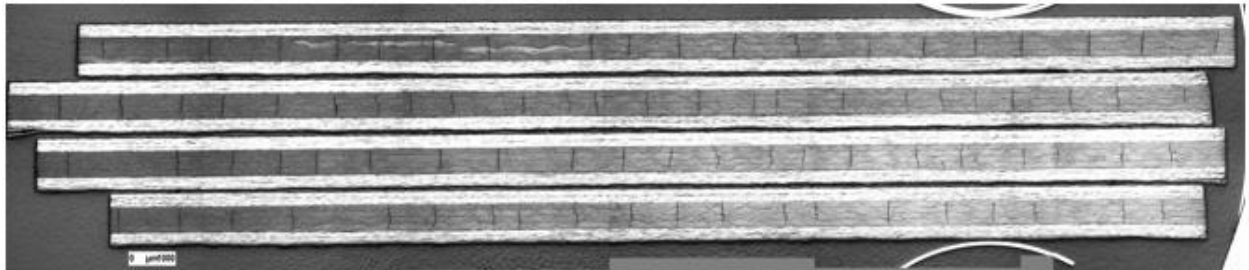


Figura 6-5. Fragmentos de la muestra 8A, observada a x25.

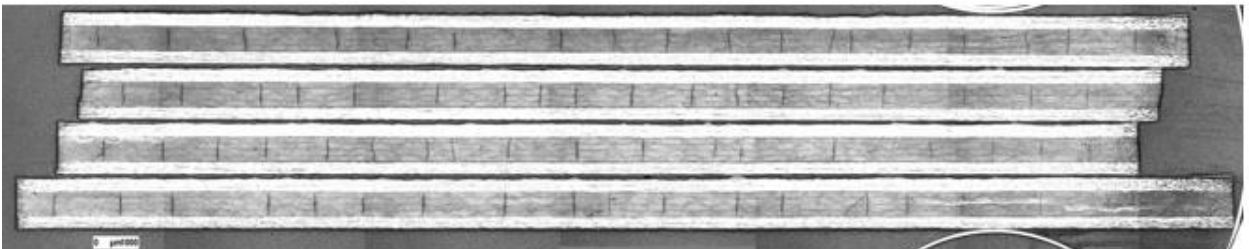


Figura 6-6. Fragmentos de la muestra 9A, observada a x25.



Figura 6-7. Fragmentos de la muestra 10A, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
6A	78.5	11.12	69	6.17
7A	78.93	10.94	70	6.4
8A	79.7	13.06	85	6.51
9A	79.89	13.62	77	5.65
10A	83.08	12.71	67	5.27
Media	80.02	12.29	73.6	6

Tabla 6-2. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel A, ensayo al 80%.

Se ve que la probeta ensayada a un mayor porcentaje de carga no tiene por qué ser en la que más daño aparezca, pues si lo fuera la probeta 10A sería la que contaría con un mayor número de grietas por centímetro. Esto puede tener su origen en que los porcentajes están calculados para un valor medio de la tensión de rotura, pero en el cálculo de esta se ha visto que no todas las probetas rompían para la misma carga, si no que existía una variación típica de 69.62 MPa, por lo que no siempre se va dar esta correspondencia. La diferencia tan escasa de carga aplicada hace que la correspondencia entre nivel de tensión y carga aplicada se pueda ver solapada por esta desviación de la tensión de rotura. Además, se observa que no existe una gran dispersión de los resultados, siendo el daño observado similar en las 5 muestras.

#### 6.1.1.3 Probetas ensayadas hasta el 70% de la carga de rotura

En las Figuras 6-8 y 6-9 se muestran las fotocomposiciones de las muestras 20 y 24A, ensayadas al 70% de la tensión media de rotura. A continuación, se presentan la tabla donde se recoge el valor de la densidad de grietas.

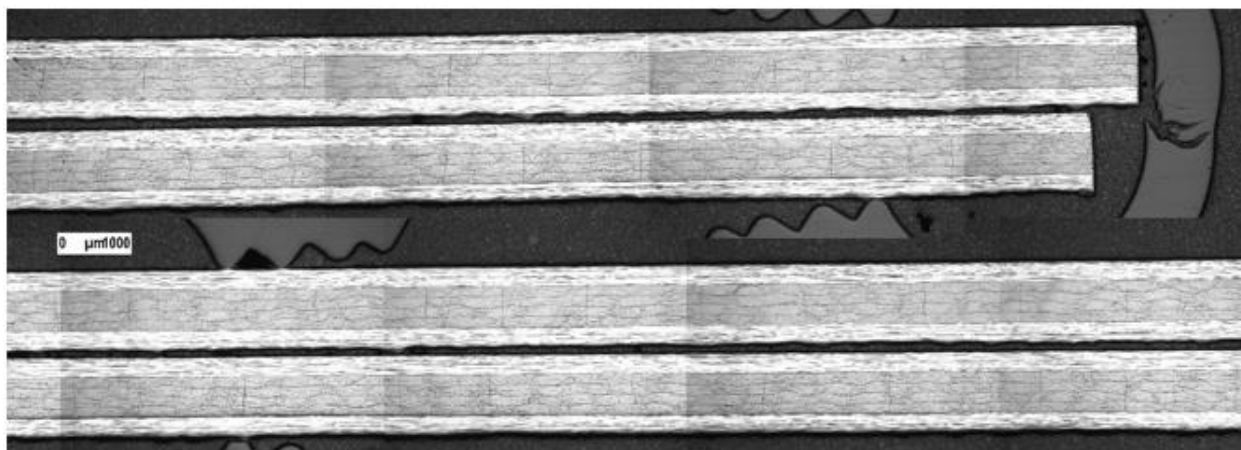


Figura 6-8. Fragmentos de la muestra 20A, observada a x25.

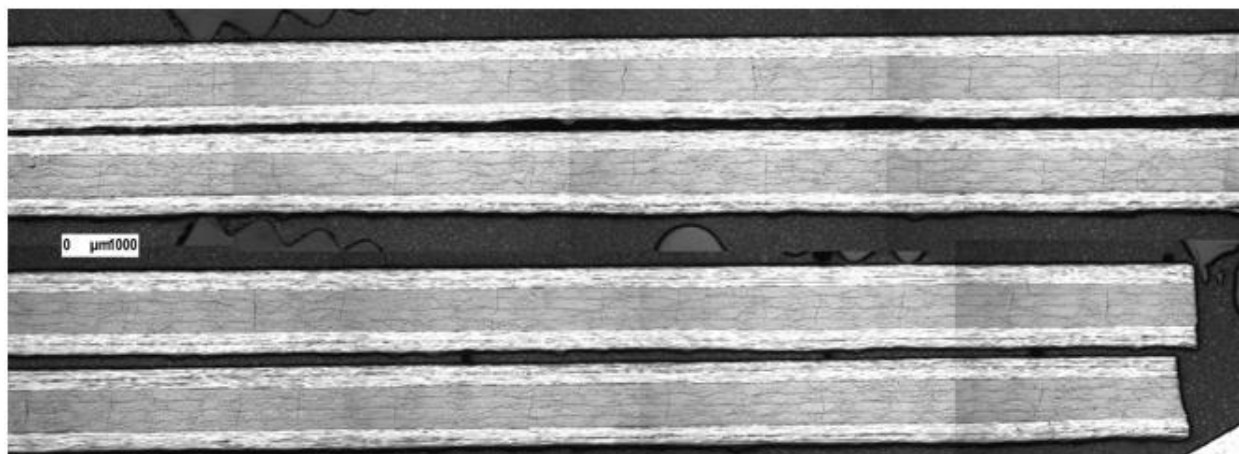


Figura 6-9. Fragmentos de la muestra 24A, observada a x25.

Muestra	$L_{TOTAL}(cm)$	%X (%)	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
20A	8.3	69.98	39	4.65
24A	8.32	70.2	45	5.41
Media	8.31	70.09	42	5.03

Tabla 6-3. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel A, ensayo al 70%.

En este caso, y al contrario de lo que sucedía en el caso del 80% de la tensión de rotura media, sí se cumple esta tendencia creciente a aparecer más daño a mayor porcentaje de carga, y se ve también que apenas hay dispersión de los resultados obtenidos.

#### 6.1.1.4 Probetas ensayadas hasta el 60% de la carga de rotura

En las Figuras 6-10 y 6-11 se muestran las fotocomposiciones de las probetas ensayadas al 60%, que se corresponden con las muestras 21A y 22A.

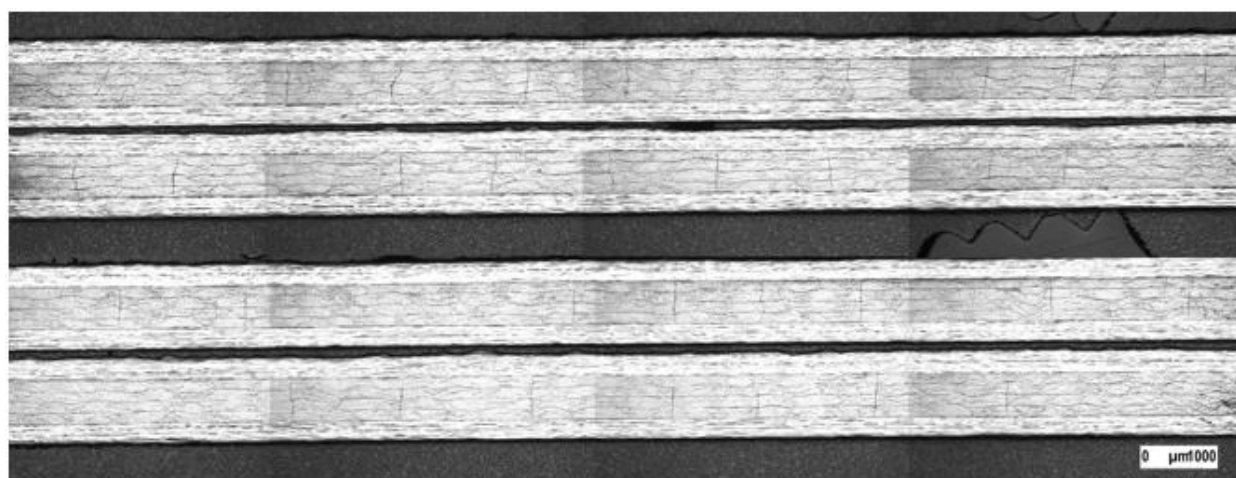


Figura 6-10. Fragmentos de la muestra 21A, observada a x25.

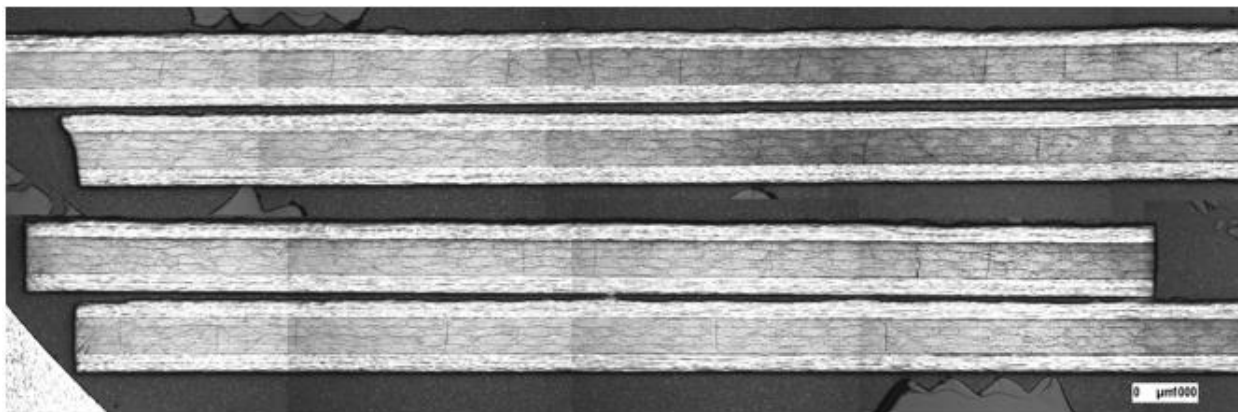


Figura 6-11. Fragmentos de la muestra 22A, observada a x25.

En la tabla 6-13 se muestran los valores medios teniendo en cuenta ambas probetas.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
21A	63.58	8.45	36	4.26
22A	60.01	9.46	22	2.325
Media	61.79	8.96	29	3.29

Tabla 6-4. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel A, ensayo al 60%.

En este caso sí que se observa bastante dispersión entre una muestra y otra. Se verá en la sección 6.1.3 que la zona de aplicación de carga del 60% al 70% de la tensión de rotura media es una zona donde el número de macrogrietas crece con pendiente elevada si se representa frente a la tensión, lo que puede justificar el hecho de que al pasar del 60.1% al 63.58% el número de grietas crezca rápidamente.

#### 6.1.1.5 Probetas ensayadas hasta el 50% de la carga de rotura

En las Figuras 6-12 a 6-16 se muestran las fotocomposiciones de las probetas ensayadas al 50%, que se corresponden con las muestras 11 a 15A del panel con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_5$ .

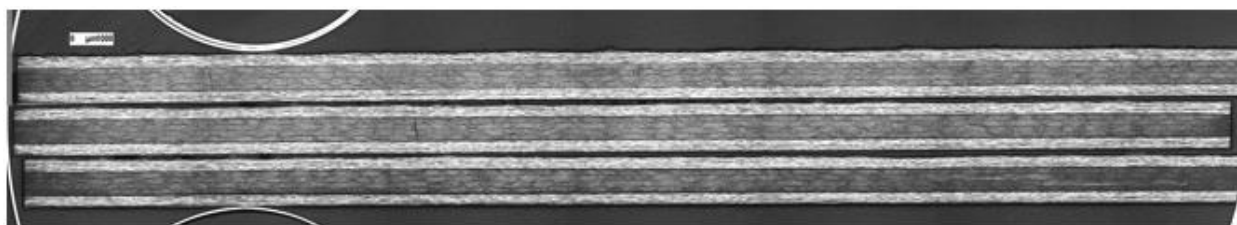


Figura 6-12. Fragmentos de la muestra 11A, observada a x25.

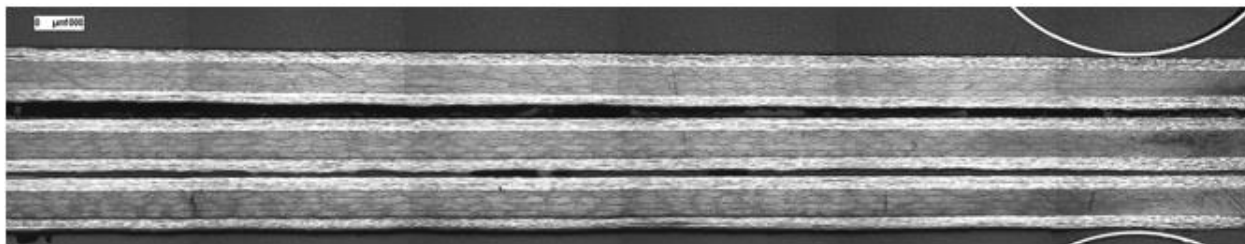


Figura 6-13. Fragmentos de la muestra 12A, observada a x25.

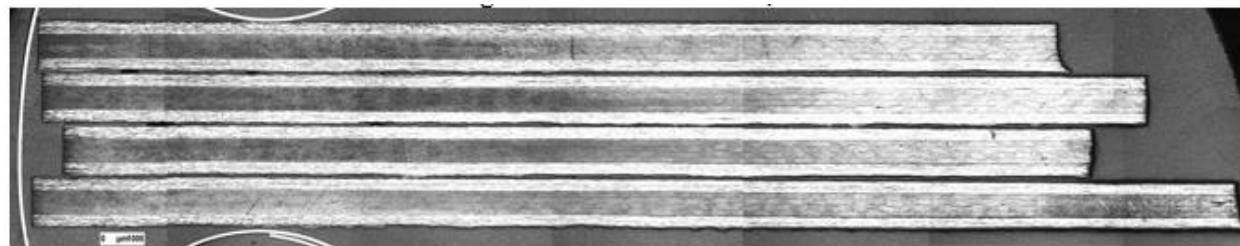


Figura 6-14. Fragmentos de la muestra 13A, observada a x25.

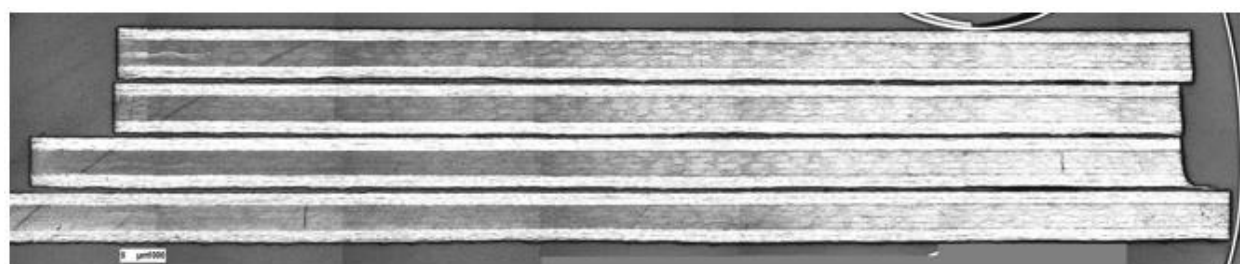


Figura 6-15. Fragmentos de la muestra 14A, observada a x25.

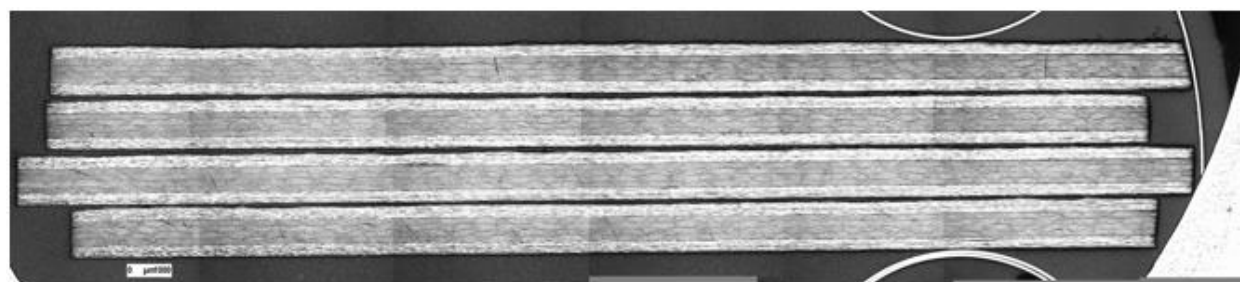


Figura 6-16. Fragmentos de la muestra 15A, observada a x25.

La tabla 6-5 recoge la densidad de grietas de las muestra 11-15A.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
11A	48.89	10.95	2	0.183
12A	48.66	9.87	3	0.304
13A	50.1	12.96	3	0.231
14A	49.9	13.08	2	0.153
15A	50.13	13.27	0	0
Media	48.54	12.03	2	0.17

Tabla 6-5. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel A, ensayo al 50%.

En el caso de las probetas ensayadas al 50% de la tensión de rotura media no se observa una gran dispersión. El hecho de encontrar probetas con un número de grietas entre 0 y 3 hace pensar que este nivel de carga es cercano al nivel de carga para el cual aparece la primera grieta.

#### 6.1.1.6 Probetas ensayadas hasta el 40% de la carga de rotura

Tal y como se han procedido para el resto de niveles de carga a continuación se muestran los montajes correspondientes con las muestras 18 y 19A, ensayadas al 40% de la carga de rotura, así como una tabla donde se exponen la densidad de grietas y porcentaje de carga aplicado para cada probeta.

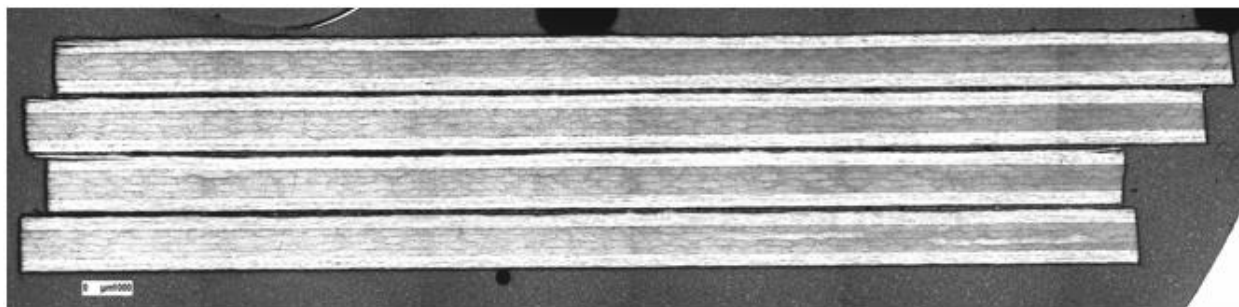


Figura 6-17. Fragmentos de la muestra 18A, observada a x25.

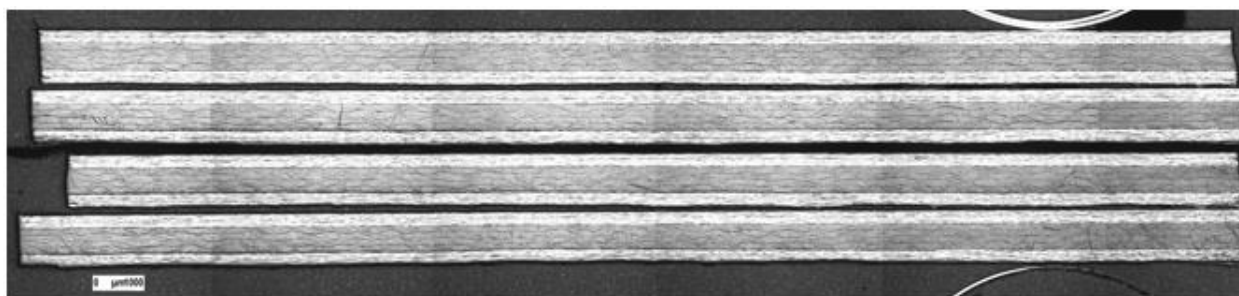


Figura 6-18. Fragmentos de la muestra 19A, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
18A	40.17	11.91	0	0
19A	40.08	9.46	1	0.106
Media	40.12	10.68	0.5	0.053

Tabla 6-6. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel A, ensayo al 40%.

Se observa que en la probeta 19A aparece una grieta, cuando en una de las ensayadas al 50% de la carga de rotura, la muestra 15A, no aparecía ninguna. Esta variación del daño observado puede deberse, tal y como se comentó en el apartado 6.1.1.2, a la desviación existente en el cálculo de la tensión de rotura media, indicador de que no todas las probetas rompen a la misma carga. Además, refuerza la idea de que la primera grieta transversal aparece para un nivel de carga medio cercano al 40% de la tensión de rotura media.

#### 6.1.1.7 Probetas ensayadas hasta el 30% de la carga de rotura

Las Figuras 6-19 y 6-20 representan el montaje de las muestras 16A y 17A, respectivamente, a x25. En la tabla 6-7 se recogen los valores medios de porcentaje de carga aplicado y densidad de grietas.

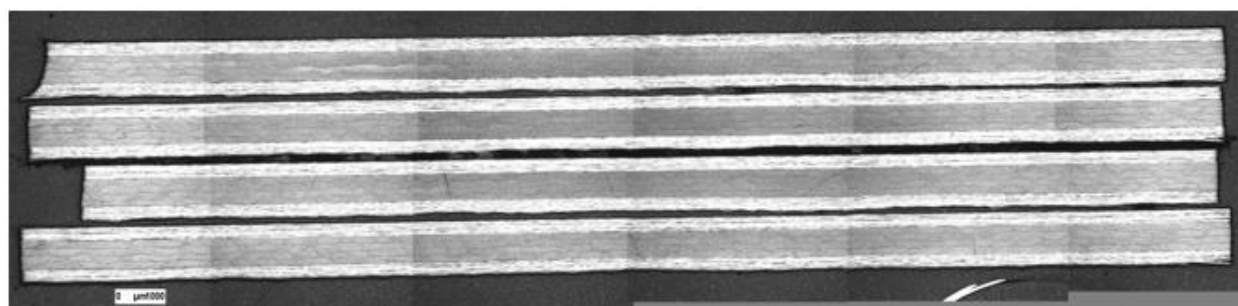


Figura 6-19. Fragmentos de la muestra 16A, observada a x25.

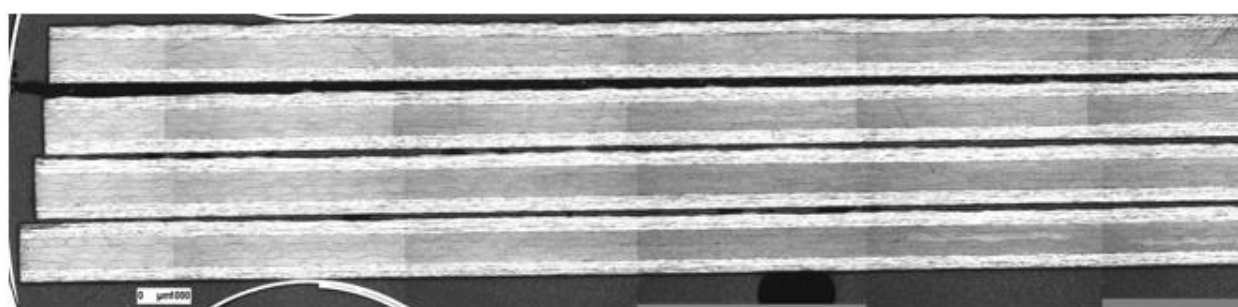


Figura 6-20. Fragmentos de la muestra 17A, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
16A	30.27	12.35	0	0
17A	30.05	11.88	0	0
Media	30.16	12.115	0	0

Tabla 6-7. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel A, ensayo al 30%.



En el análisis de los valores medios obtenidos para las muestras ensayadas al 30% de la tensión de rotura media se ve que para este nivel de carga no aparecen macrogrietas en el panel A, luego la primera grieta aparece a un nivel de carga superior. En el apartado 7 se analizarán estas muestras a más aumentos para ver los tipos de daño que aparecen.

### 6.1.2 Densidad de grietas transversales: Observaciones en el panel B, $[0_2, 90_4]_S$

Se procede aquí de la misma forma que para el panel A. En primer lugar se muestran las fotocomposiciones correspondientes a cada una de las muestras ensayadas a un determinado porcentaje de la carga de rotura del panel B y a continuación se muestra la tabla donde se da la densidad de grietas por centímetro.

#### 6.1.2.1 Probetas ensayadas hasta el 90% de la carga de rotura

En las Figura 6-21 se recoge la fotocomposición de la muestra 25B. A continuación se expone la tabla de propiedades.

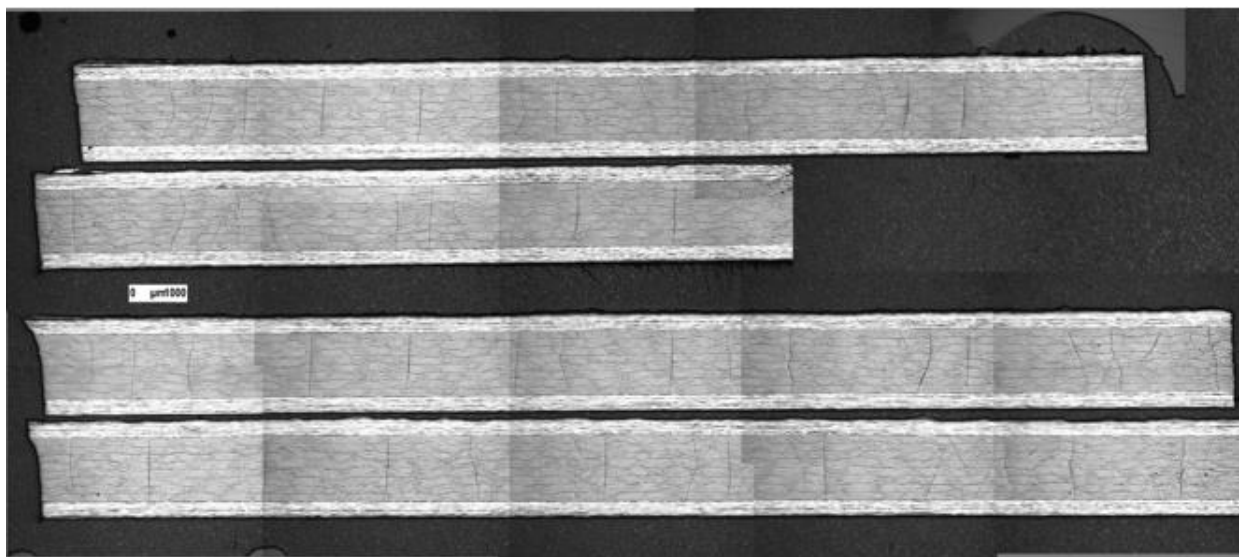


Figura 6-21. Fragmentos de la muestra 25B, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
25B	89.996	9.55	57	5.97

Tabla 6-8. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel B, ensayo al 90%.

#### 6.1.2.2 Probetas ensayadas hasta el 80% de la carga de rotura

En las Figuras 6-22 a 6-26 se recogen las fotocomposiciones realizadas de las muestras 6 a 10B, ensayadas al 80% de la tensión media de rotura calculada para el panel B. En la tabla 6-9 se muestran los valores medios calculados con todas las muestras ensayadas al 80% de la carga de rotura lo que permite obtener un valor numérico representativo que más adelante servirá para realizar comparaciones de daño entre paneles.



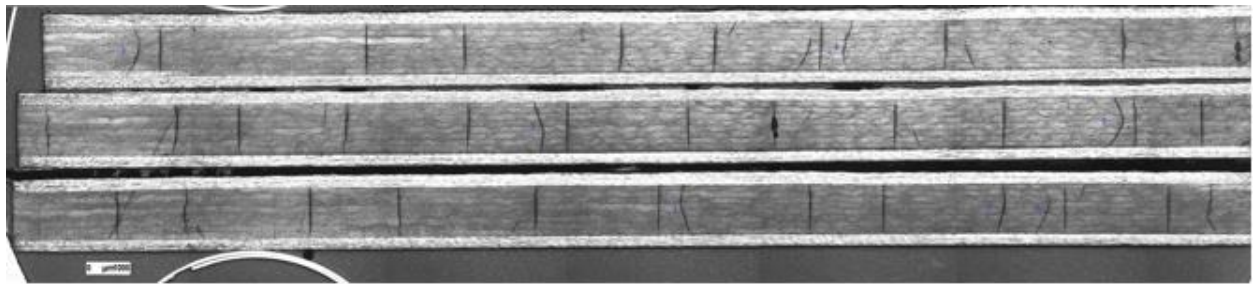


Figura 6-22. Fragmentos de la muestra 6B, observada a x25.

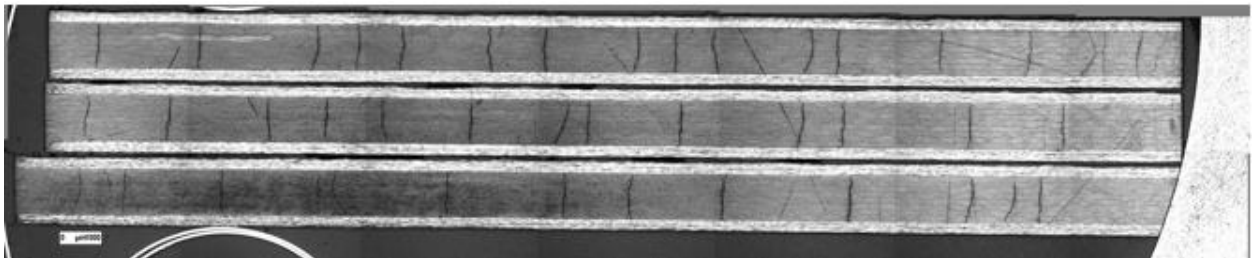


Figura 6-23. Fragmentos de la muestra 7B, observada a x25.

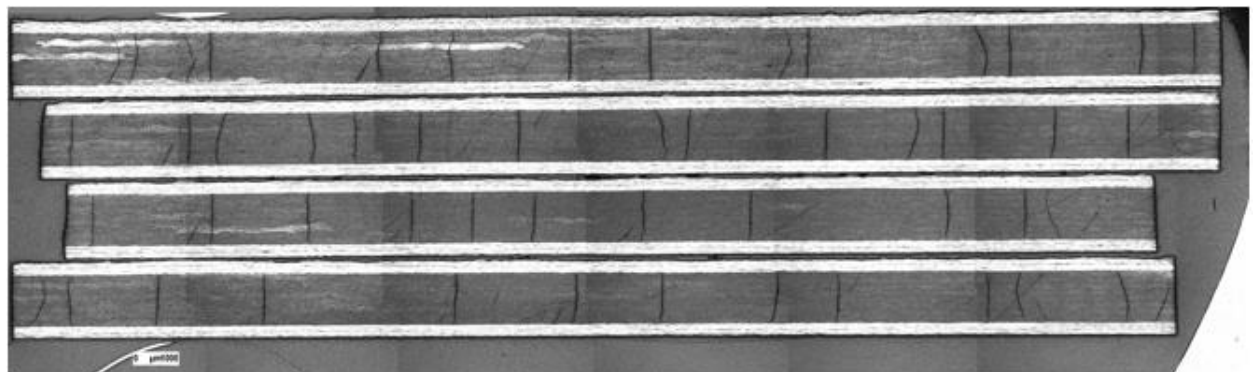


Figura 6-24. Fragmentos de la muestra 8B, observada a x25.

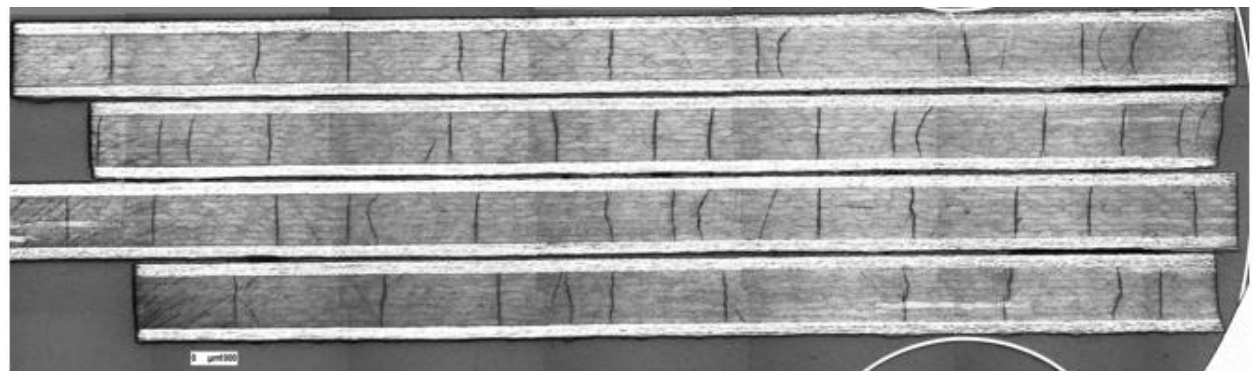


Figura 6-25. Fragmentos de la muestra 9B, observada a x25.



Figura 6-26. Fragmentos de la muestra 10B, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
6B	79.72	10.82	39	3.6
7B	80.37	10.95	44	4.02
8B	80.02	13.25	52	3.92
9B	80.13	13.13	53	4.035
10B	80.17	13.11	49	3.86
Media	80.08	12.252	47.4	3.89

Tabla 6-9. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel B, ensayo al 80%.

#### 6.1.2.3 Probetas ensayadas hasta el 70% de la carga de rotura

En las Figuras 6-27 y 6-28 se muestran las fotocomposiciones de las muestras 23 y 24B, ensayadas al 70% de la tensión media de rotura calculada para el panel B.

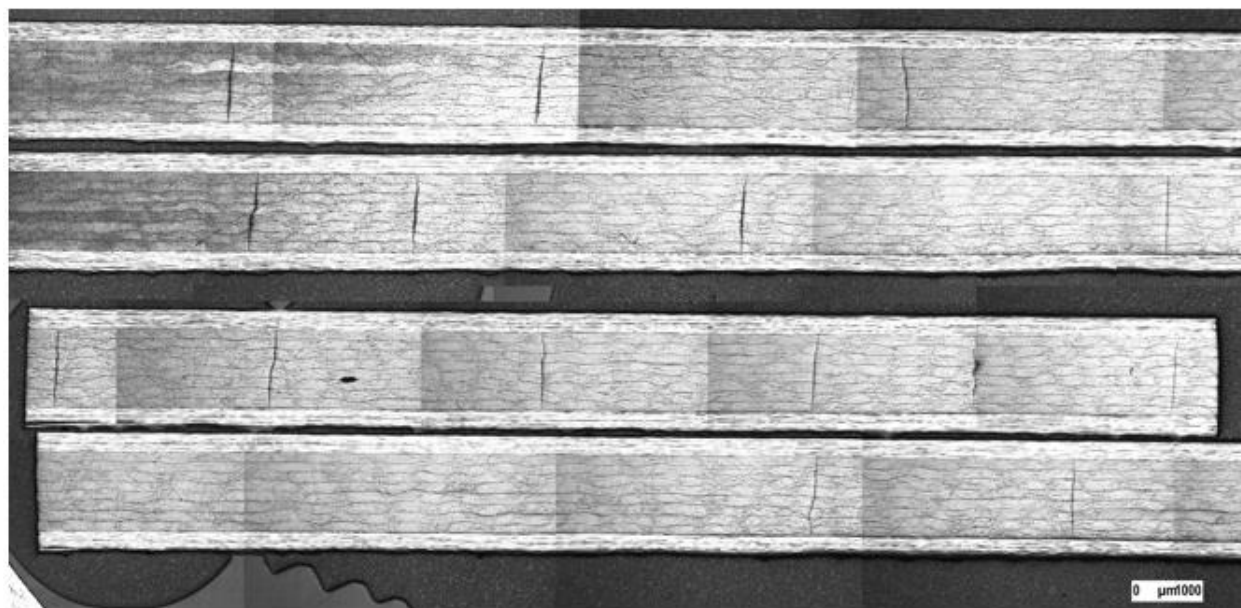


Figura 6-27. Fragmentos de la muestra 23B, observada a x25.

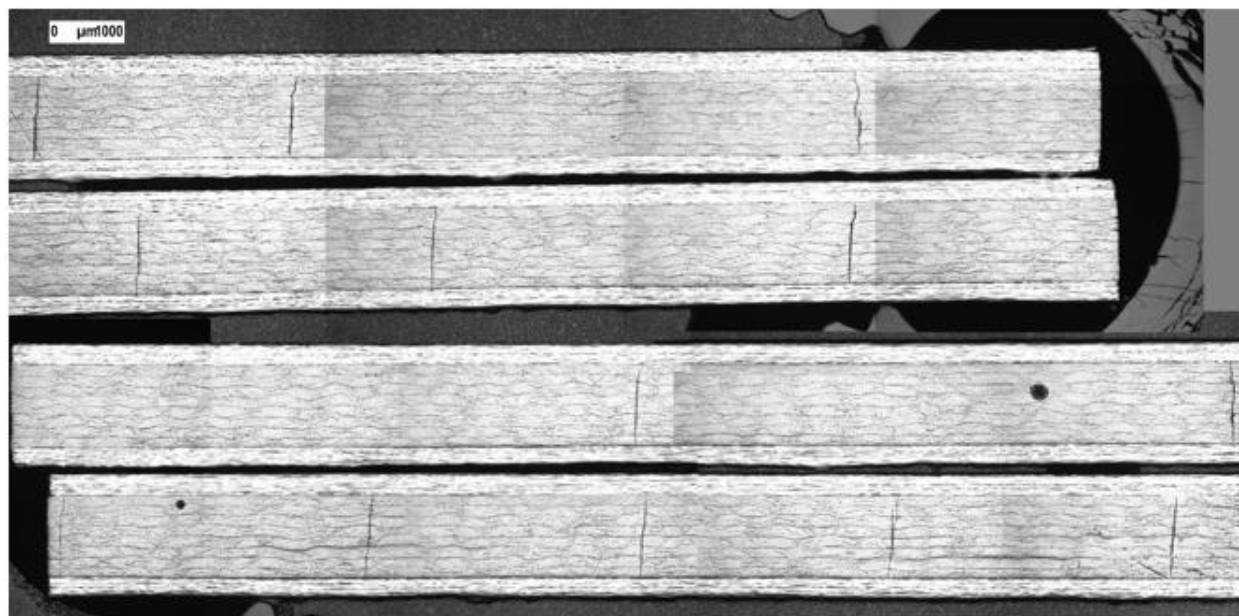


Figura 6-28. Fragmentos de la muestra 24B, observada a x25.

La tabla 6-10 muestra los datos del ensayo y densidad de grietas recogidas hasta ahora para estas muestras y se calculan los valores medios.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
23B	69.64	8.82	29	3.28
24B	70.08	8.86	32	3.45
Media	69.86	8.84	30.5	3.36

Tabla 6-10. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel B, ensayo al 70%.

Se ve que al 70% de la carga de rotura del panel B apenas hay dispersión de resultados.

#### 6.1.2.4 Probetas ensayadas hasta el 60% de la carga de rotura

A continuación se muestran las fotocomposiciones correspondientes a las muestras 21 y 22B. En la tabla 6-11 se recogen los valores medios de los datos extraídos para cada una de las muestras ensayadas al 60% de la tensión media de rotura.

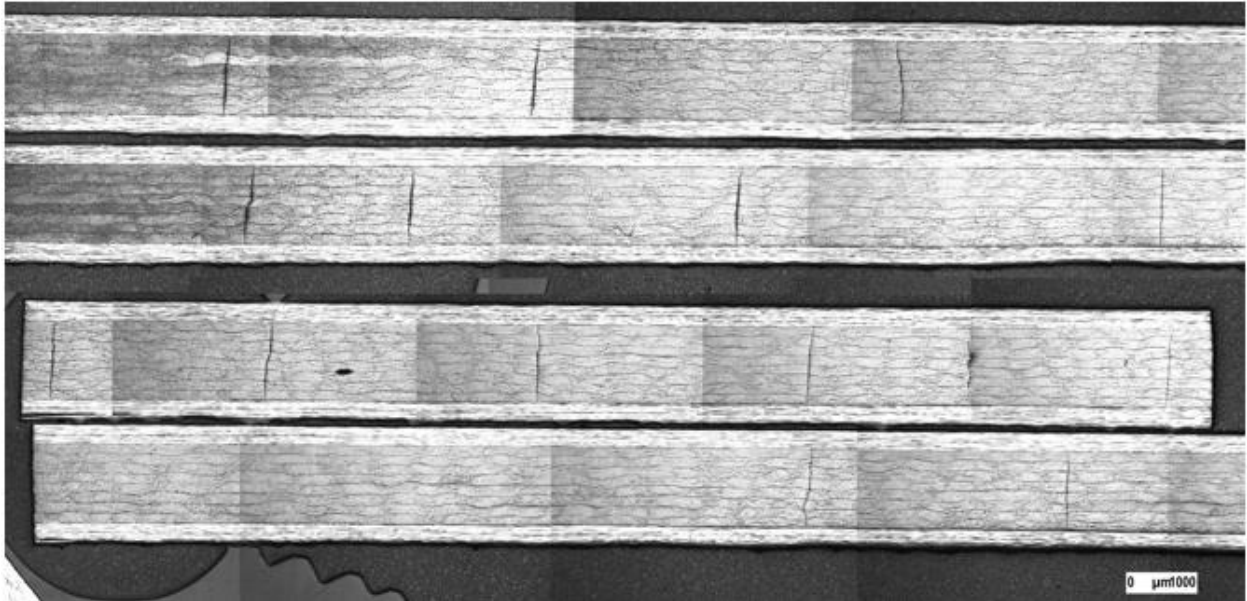


Figura 6-29. Fragmentos de la muestra 21B, observada a x25.

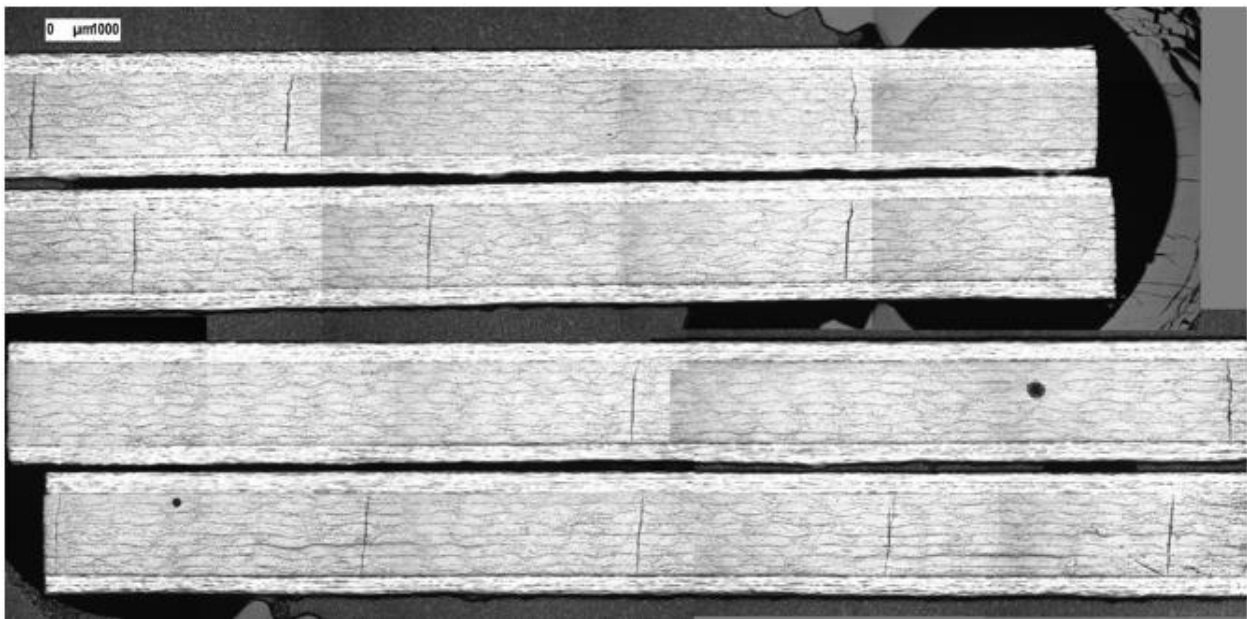


Figura 6-30. Fragmentos de la muestra 22B, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
21B	60.02	9.86	15	1.655
22B	59.77	8.16	12	1.47
Media	59.8995	9.01	13.5	1.56

Tabla 6-11. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel B, ensayo al 60%.

### 6.1.2.5 Probetas ensayadas hasta el 50% de la carga de rotura

En las Figuras 6-31 a 6-35 se muestran las fotocomposiciones de las probetas ensayadas al 50%, que se corresponden con las muestras 11 a 15B del panel con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_5$ . A continuación, se muestra la tabla 6-12 de valores medios.

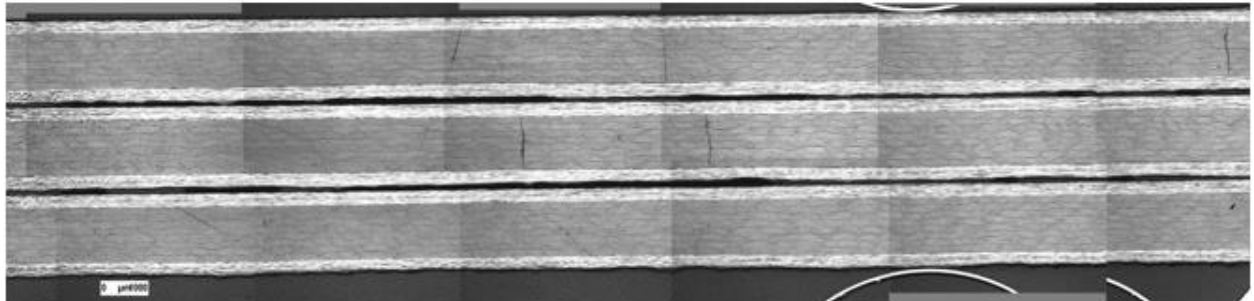


Figura 6-31. Fragmentos de la muestra 11B, observada a x25.

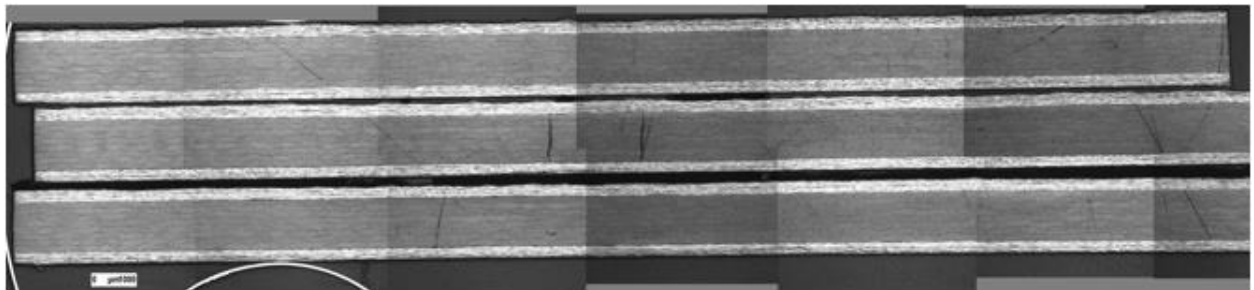


Figura 6-32. Fragmentos de la muestra 12B, observada a x25.

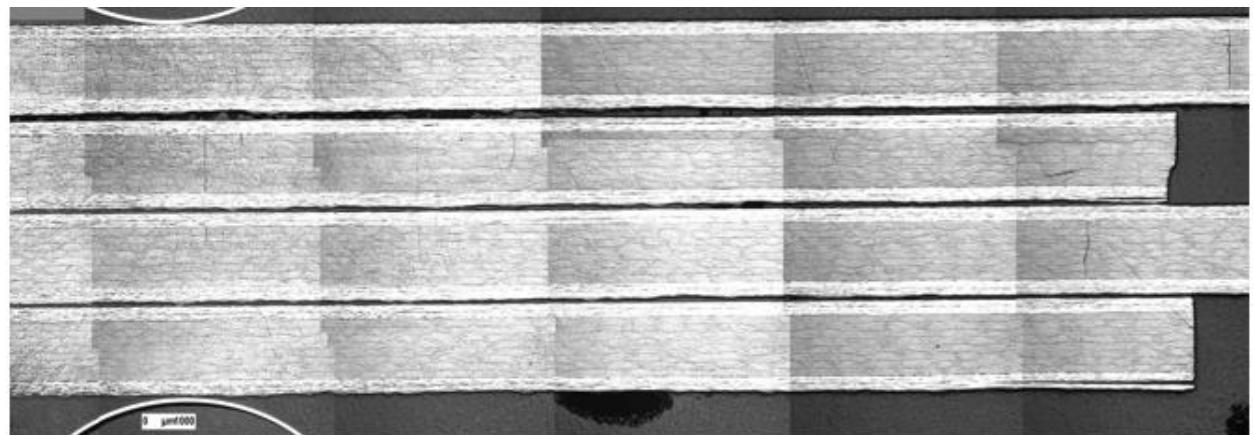


Figura 6-33. Fragmentos de la muestra 13B, observada a x25.

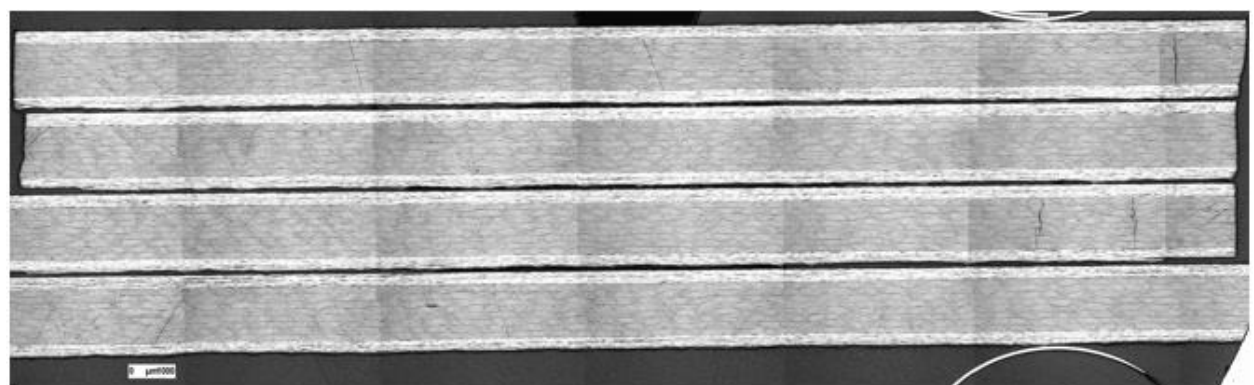


Figura 6-34. Fragmentos de la muestra 14B, observada a x25.



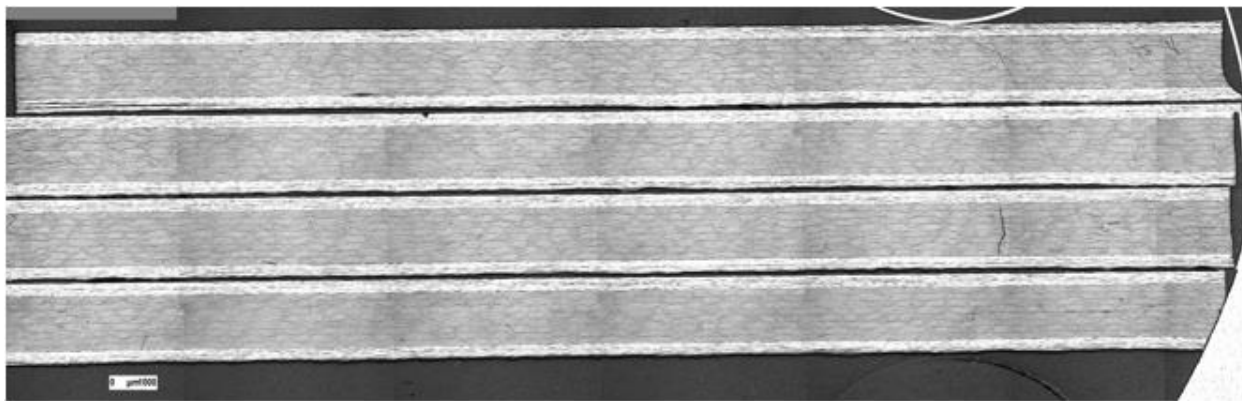


Figura 6-35. Fragmentos de la muestra 15B, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
11B	49.35	9.91	3	0.302
12B	49.63	10.67	2	0.187
13B	49.56	11.83	2	0.169
14B	49.87	13.81	3	0.217
15B	51.12	13.39	1	0.0747
Media	49.91	11.922	2.2	0.19

Tabla 6-12. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel B, ensayo al 50%.

Se observa que los resultados obtenidos para cada una de las muestras ensayadas al 50% se asemejan bastante, lo que da indicios de la fiabilidad de la media de los resultados.

#### 6.1.2.6 Probetas ensayadas hasta el 40% de la carga de rotura

A continuación las fotocomposiciones, tabla de propiedades y valores medios de las muestras 18 y 19B.

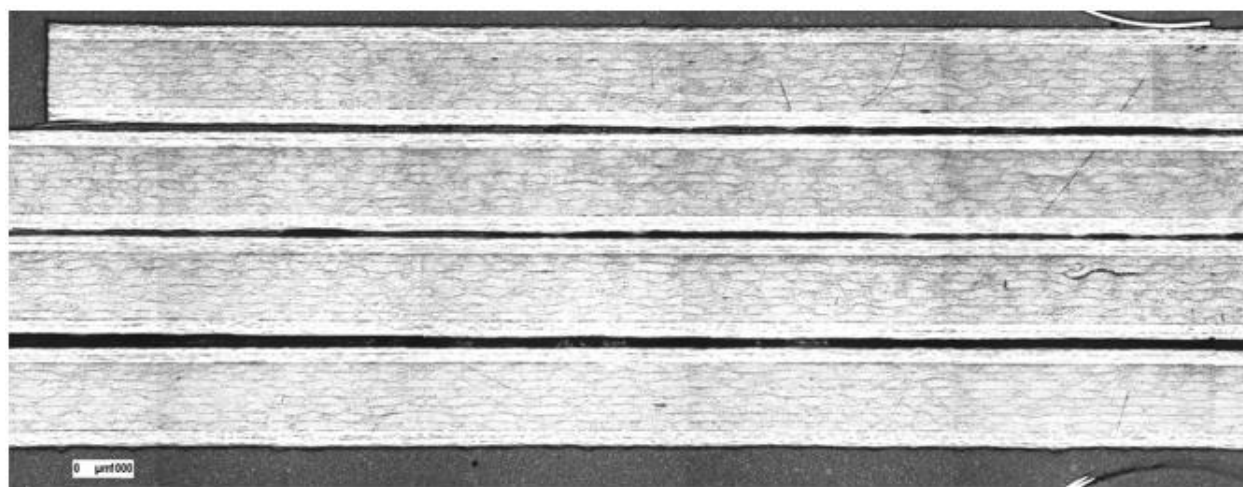


Figura 6-36. Fragmentos de la muestra 18B, observada a x25.

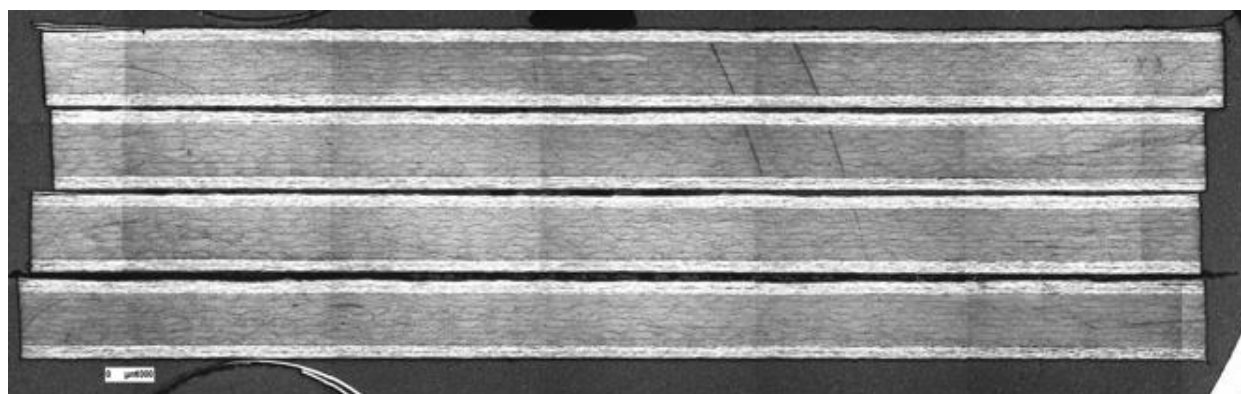


Figura 6-37. Fragmentos de la muestra 19B, observada a x25.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
18B	40.37	10.67	0	0
19B	40.16	12.65	0	0
Media	40.265	11.66	0	0

Tabla 6-13. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel B, ensayo al 40%.

Tal y como se observaba en la fotocomposición, al 40% de la carga de rotura no aparecen grietas transversales en ninguna de las probetas ensayadas.

#### 6.1.2.7 Probetas ensayadas hasta el 30% de la carga de rotura

Las Figuras 6-38 y 6-39 recogen las fotocomposiciones de las muestras 16 y 17B ensayadas al 30% de la carga de rotura, donde no se observan daños en la probeta a esta escala.

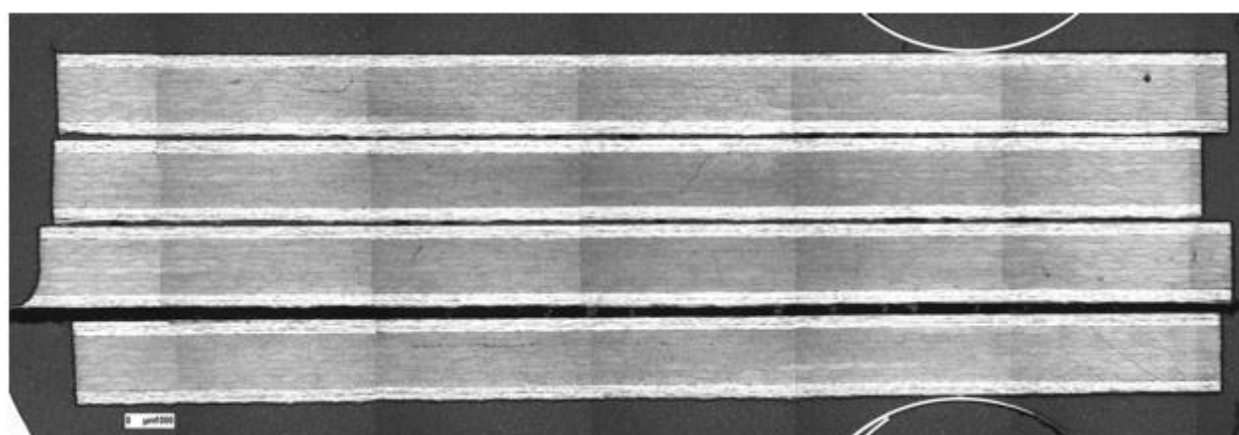


Figura 6-38. Fragmentos de la muestra 16B, observada a x25.

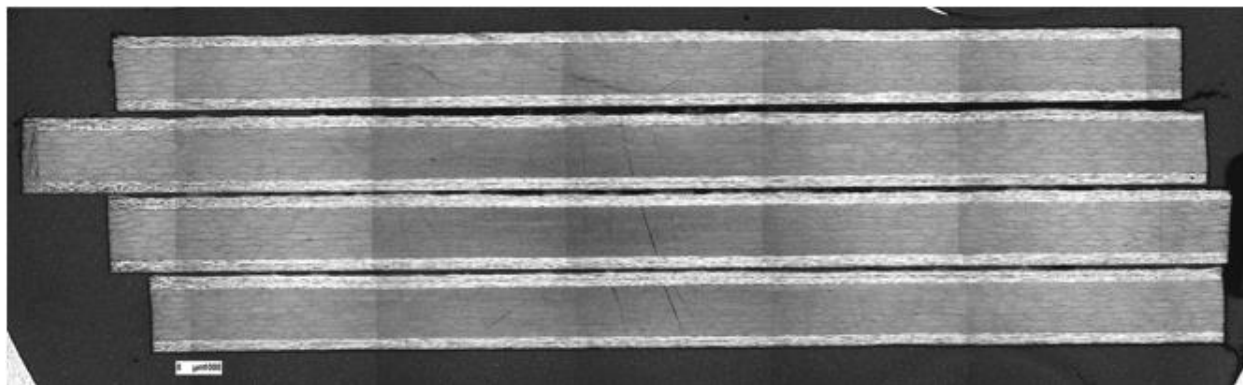


Figura 6-39. Fragmentos de la muestra 17B, observada a x25.

En la tabla 6-40 se muestran los valores medios.

Muestra	%X (%)	$L_{TOTAL}(cm)$	$n_{TOTAL}$	n° de grietas por cm
16B	30.02	12.51	0	0
17B	30.04	12.79	0	0
Media	30.03	12.65	0	0

Tabla 6-14. Resultados del n° de grietas para cada muestra del panel B, ensayo al 30%.

Tal y como se vio con el 40% de carga, y por tanto, tal y como era de esperar, no se aprecia ninguna grieta en ninguna de las muestras obtenidas por lo que el cálculo de valores medios se hace innecesario.

### 6.1.3 Densidad de grietas transversales: Análisis de resultados

Una vez hecho el recuento del número de grietas transversales que aparecen por unidad de longitud para cada nivel de carga se puede realizar un estudio a esta escala de evolución del daño con el nivel de tensión aplicado. Se procederá analizando los datos recogidos para cada uno de los paneles bajo estudio y, a continuación, se realizará un estudio comparativo.

En el Gráfico 6-1 se puede observar una nube de puntos que representan cada una de las muestras analizadas del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y que nos dan la relación entre el número de grietas por centímetro que aparecen en la muestra y la tensión a la que esta está sometida.



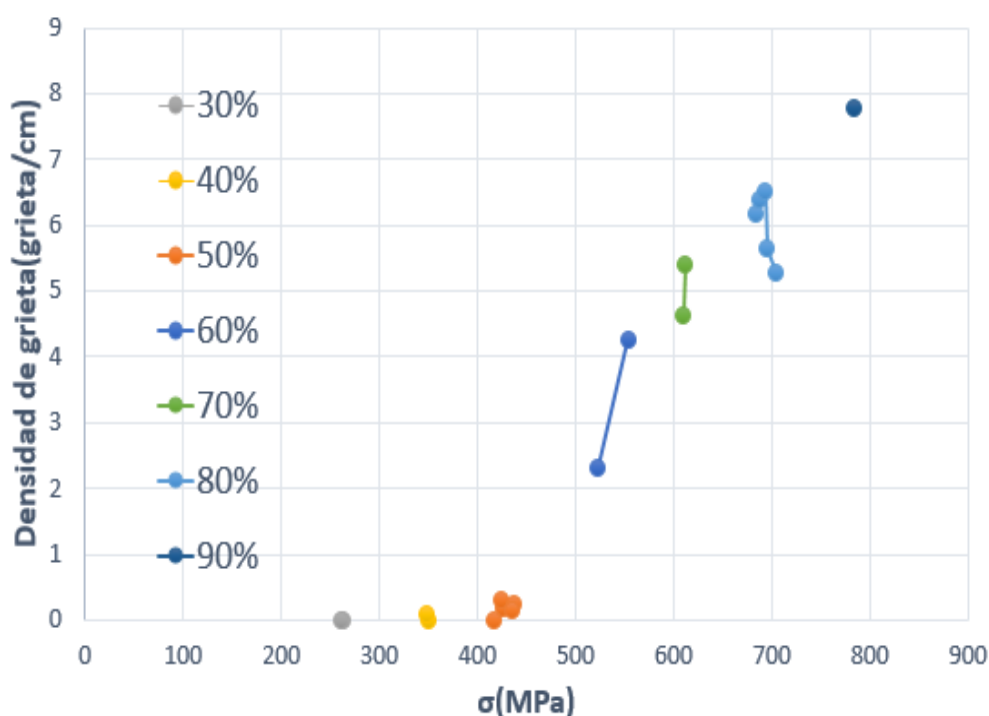


Gráfico 6-1. Evolución del número de grietas por centímetro en función de la tensión aplicada para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

Tal y como era de esperar, un aumento del nivel de carga trae consigo un crecimiento en el daño sufrido por el laminado. A la hora de analizar la evolución de las grietas transversales se procede buscando la primera grieta y ampliando el estudio hacia niveles de carga superiores.

Se puede observar que para los ensayos realizados en el panel A, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_S$ , la primera grieta aparece en una probeta ensayada al 40% del valor medio de la tensión rotura, que ha soportado una tensión máxima de 349.81 MPa. Sin embargo, se da que en una de las probetas ensayadas al 50% de carga no aparece ninguna grieta. Este fenómeno puede tener su origen en el hecho de que, tal y como se observó en el cálculo de la resistencia del laminado, no todas las probetas aguantan la misma carga debido a heterogeneidades del material o posibles defectos de fabricación. La variación en el valor de la tensión aplicada a las probetas ensayadas al 40% y al 50% del nivel de tensión va desde los 355.3 MPa a los 436.56 MPa, lo cual está dentro del rango de variación encontrado en los ensayos de rotura, donde las muestras rompieron a tensiones entre 747.52 MPa y 909.95 MPa y hace posible encontrar discrepancias como esta.

Una vez aparece la primera grieta se encuentra un rango donde el número de grietas apenas crece con el porcentaje de carga aplicado. Sin embargo, cuando se alcanza el intervalo de tensión entre el 50% y el 60% de la resistencia del panel el número de grietas por unidad de longitud crece con una pendiente elevada. Es decir, hasta aproximadamente el 50% del nivel de tensión apenas se aprecia daño a esta escala, pero una vez aparecen las primeras grietas transversales estas crecen a un ritmo elevado.

En las probetas ensayadas a un 60% de nivel de tensión se muestra una alta dispersión entre las dos muestras ensayadas, que puede estar relacionado con el fenómeno de variación de resistencia en cada probeta, o con el hecho de que la probeta con menor y mayor número de grietas por unidad de longitud ha sido ensayada al 60.01% y al 63.58% respectivamente, y, como se ha comentado, esta es una zona de crecimiento elevado. Este tipo de discrepancias se ven más solventadas en aquellos niveles de carga a los que se ha ensayado un mayor número de muestras, como es el caso de las muestras ensayadas al 80%, donde también se aprecia dispersión entre alguna de sus muestras pero la existencia de valores medios entre los resultados más alejados la atenúan, dando una mayor fiabilidad a los resultados.

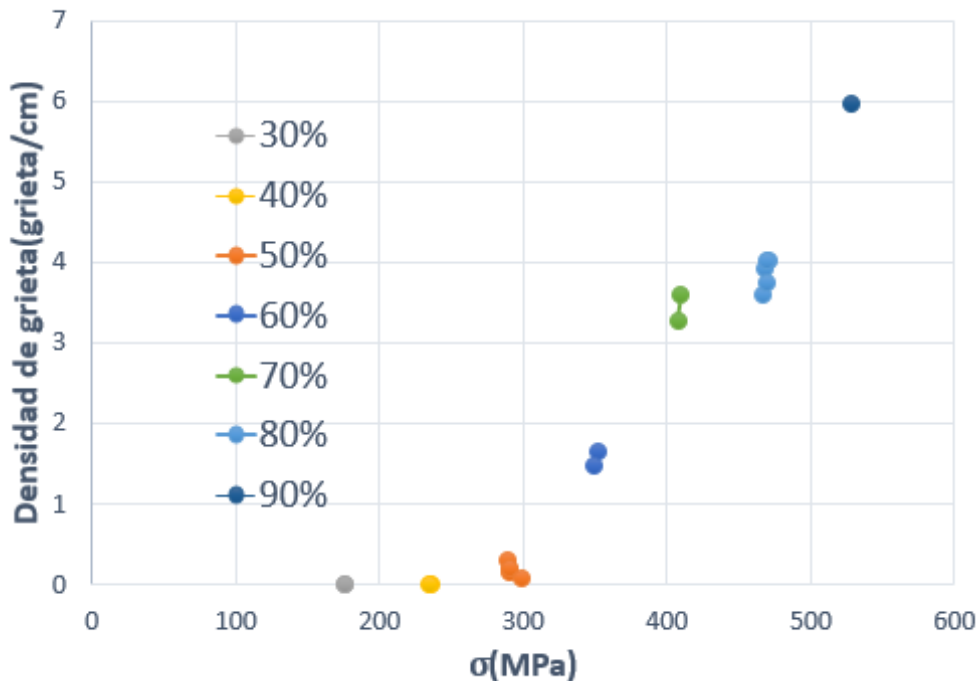


Gráfico 6-2. Evolución del número de grietas por centímetro en función de la tensión aplicada en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Procediendo de igual forma con el panel B, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_S$ , en el Gráfico 6-2 se recoge, para cada una de las muestras, la relación entre el número de grietas por centímetro que aparecen en la muestra y la tensión. Esta relación permite ver cuantitativamente la relación creciente del daño con la tensión aplicada que es de esperar.

Para el panel grueso la primera grieta aparece para un 50% de la tensión de rotura media calculada para este panel, apareciendo alguna grieta en todas las muestras ensayadas. Esto hace pensar que la aparición de la primera grieta estará a niveles de tensión entre el 40% y el 50% de la tensión de rotura, ya que en el panel B la dispersión encontrada en los ensayos de rotura ha sido menor.

Por otro lado, tal y como se observaba en el panel A, entre el 50% y el 60% se aprecia que el número de grietas comienza a crecer rápidamente con la carga de ensayo. Es decir, una vez se ha producido la primera grieta transversal estas crecen rápidamente hasta la rotura del material.

Por último, si se realiza una comparación cualitativa entre el Gráfico 6-1 y el Gráfico 6-2 se puede observar que para un mismo nivel de carga, la dispersión de resultados obtenido entre las muestras es menor en el panel B que en el panel A. Este fenómeno ya se observaba en la determinación de la carga de rotura, donde la variación típica y errores calculados fueron menores para el panel B.

Una vez establecida la relación entre el nivel de tensión aplicado y la iniciación y desarrollo del daño en cuanto a aparición de grietas transversales para cada laminado se procede a la comparación entre ambos. A la hora de

realizar comparaciones, tanto en la escala que nos ocupa como en adelante, estas se realizarán para el mismo porcentaje de carga aplicado respecto a la tensión de rotura media calculada para cada laminado en particular.

En el Gráfico 6-3 se muestra el número de grietas por centímetro que aparece en cada laminado para cada porcentaje pero ya no a nivel de muestra, si no mediante los valores medios calculados en las secciones 6.1.1 y 6.1.2 para cada nivel de tensión. Esta representación permite visualizar la tendencia general de crecimiento del daño observada en cada panel por separado y realizar una comparación.

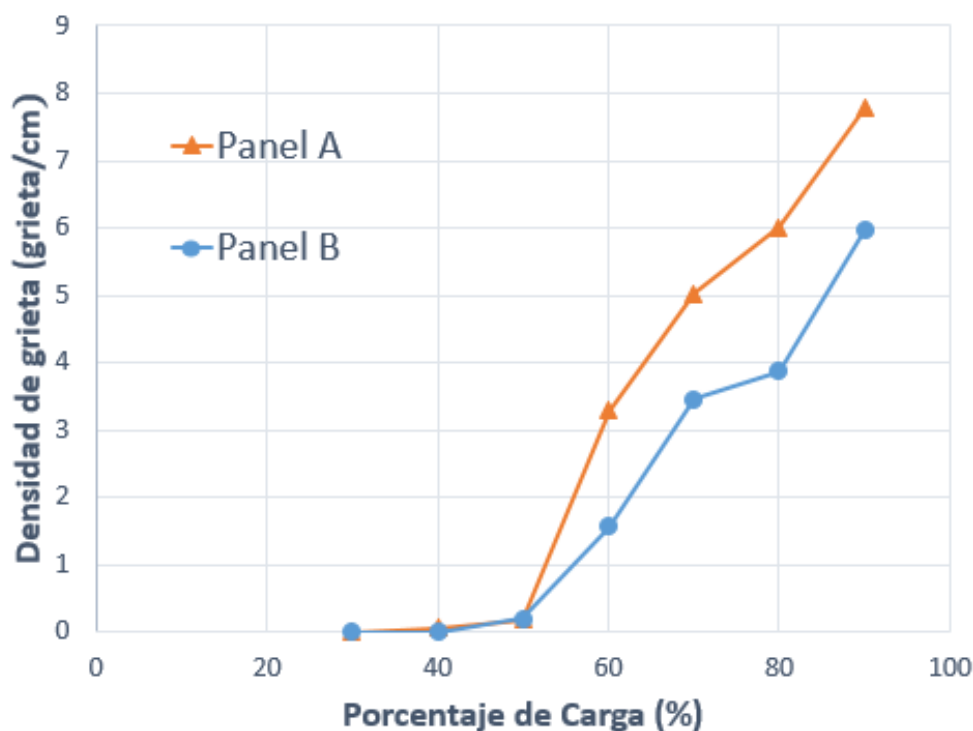


Gráfico 6-3. Densidad de grieta frente a porcentaje de la tensión de rotura media para el panel A,  $[0_2, 90_2]_s$  y B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

Se observa que hasta el 50% de carga ambas curvas representadas presentan la misma tendencia, es decir, hasta este nivel de tensión ambos laminados desarrollan un número de grietas transversales similar. Sin embargo, a partir de este nivel de tensión, y a pesar de que ambas curvas presentan el elevado aumento de densidad de grietas frente a tensión aplicada ya observada en las Gráficas 6-1 y 6-2 se ve que en la curva correspondiente al panel A esta pendiente es mucho más acusada, llegando a ser la densidad de grietas en el panel A 1.53 veces la densidad de grietas en el panel B.

No se puede perder de vista el hecho de que la resistencia a rotura es mayor en el panel A que en el panel B, por lo que la carga aplicada a cada porcentaje de carga también ha sido mayor, pudiendo causar más daño. En el gráfico 6-4 se ve la evolución del daño con la tensión aplicada en MPa, donde cada uno de los puntos señalados mediante un marcador representa un porcentaje de la carga de rotura.

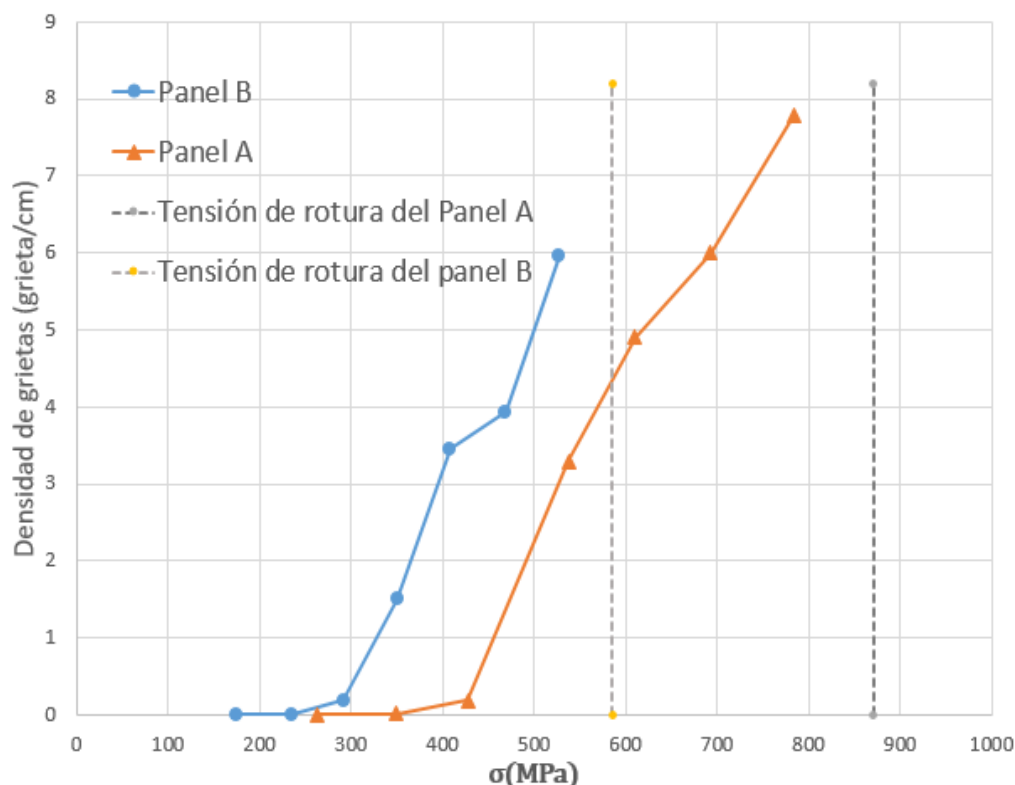


Gráfico 6-4. Densidad de grieta frente a tensión para el panel A,  $[0_2, 90_2]_s$ , y B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

Al igual que en el Gráfico 6-3 se aprecia el hecho de que hasta la aplicación de un 50% de la tensión de rotura media calculada ambos laminados cuentan con la misma densidad de grietas transversales, incrementándose el crecimiento a partir de este punto con una pendiente similar. Se observa ahora que para un mismo nivel de tensión el panel B presenta un mayor número de grietas por unidad de longitud que el panel A y, que además, la primera grieta aparece para un nivel de tensión inferior en el panel B (292.58 MPa frente a 435.43 en el panel A), es decir, el daño se inicia y propaga más rápidamente en el panel grueso pero no llega a alcanzar la densidad de grietas que el panel delgado, porque es menos resistente. En el análisis de micrografías a un mayor número de aumentos que se realizará en el capítulo 7 se hará un estudio de los defectos internos que aparecen en los paneles y originan que el panel B rompa antes sin alcanzar el nivel de daño a esta escala que sufre el panel A.

Otro enfoque interesante a tener en cuenta es el estudio de la resistencia de cada laminado a nivel de lámina. Tal y como se ha introducido en el capítulo 2 del presente trabajo, la carga aplicada a un material compuesto se reparte entre sus láminas en función de una serie de parámetros. En la tabla 6-16 aparecen los valores de tensión que soportan, según la teoría general del laminado, las láminas a  $90^\circ$  cuando son sometidas a los distintos niveles de tensión tenidos en cuenta en el presente trabajo. Para llegar a estos resultados se han empleado tanto valores nominales indicados por el fabricante del pre-preg empleado como datos experimentales (tensiones de rotura media experimental de cada laminado). En la tabla 6-15 se exponen los datos necesarios para la resolución del problema, donde:

- $X_t \rightarrow$  Resistencia longitudinal a tracción de la lámina.
- $X_c \rightarrow$  Resistencia longitudinal a compresión de la lámina.
- $Y_t \rightarrow$  Resistencia transversal a tracción de la lámina.

- $Y_c$  → Resistencia transversal a compresión de la lámina.
- $S$  → Resistencia a cortadura.
- $E_{11}$  → Módulo de elasticidad según la dirección 1.
- $E_{22}$  → Módulo de elasticidad según la dirección 2.
- $G_{12}$  → Módulo de elasticidad tangencial o de cortadura en el plano 1-2.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
$X_t$	2207MPa	$\nu_{12}$	0.3
$X_c$	1531MPa	$\nu_{21}$	0.02127
$Y_c$	125 MPa	$G_{12}$	4.7 GPa
$Y_t$	81 MPa	$\alpha_1$	$-6.7187 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}$
$S$	114 MPa	$\alpha_2$	$15.9375 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}$
$E_{11}$	141 GPa	Tensión de Rotura A	870.85 MPa
$E_{22}$	10 GPa	Tensión de Rotura B	585.15 MPa

Tabla 6-15. Valores nominales y experimentales necesarios para el cálculo de la tensión de la lámina a  $90^\circ$  en cada uno de los laminados.

Panel A, $[0_2, 90_2]_s$		Panel B, $[0_2, 90_4]_s$	
Porcentaje de carga	$\sigma_{90}$	Porcentaje de carga	$\sigma_{90}$
90%	134.22 MPa	90%	129.19 GPa
80%	122.81 MPa	80%	117.37 MPa
70%	111.44 MPa	70%	106.37 MPa
60%	99.99 MPa	60%	95.72 MPa
50%	88.58 MPa	50%	84.92 MPa
40%	77.17 MPa	40%	74.1 MPa
30%	65.76 MPa	30%	63.29 MPa

Tabla 6-16. Tensión que soportan las láminas a  $90^\circ$  para cada nivel de carga según la Teoría General del Laminado.

Se observa, comparando ambos paneles, que la diferencia en el número de láminas de cada laminado y el hecho de que un porcentaje de la carga de rotura implique tensiones diferentes en cada laminado hacen que para cada nivel de tensión la carga se reparta en cada laminado de manera que la tensión que soportan las láminas a  $90^\circ$  es muy similar. Sin embargo, es ligeramente mayor en el panel A, lo cual concuerda con la representación frente al porcentaje de carga observada en el Gráfico 6-3, donde se veía que el número de

grietas transversales para cada porcentaje de carga es mayor en el panel A., ya que a mayor carga mayor daño. En el Gráfico 6-5, que muestra la evolución de la densidad de grietas en función de la tensión que se lleva la lamina de 90°, se aprecia un cambio en la tendencia del crecimiento de densidad de grietas.

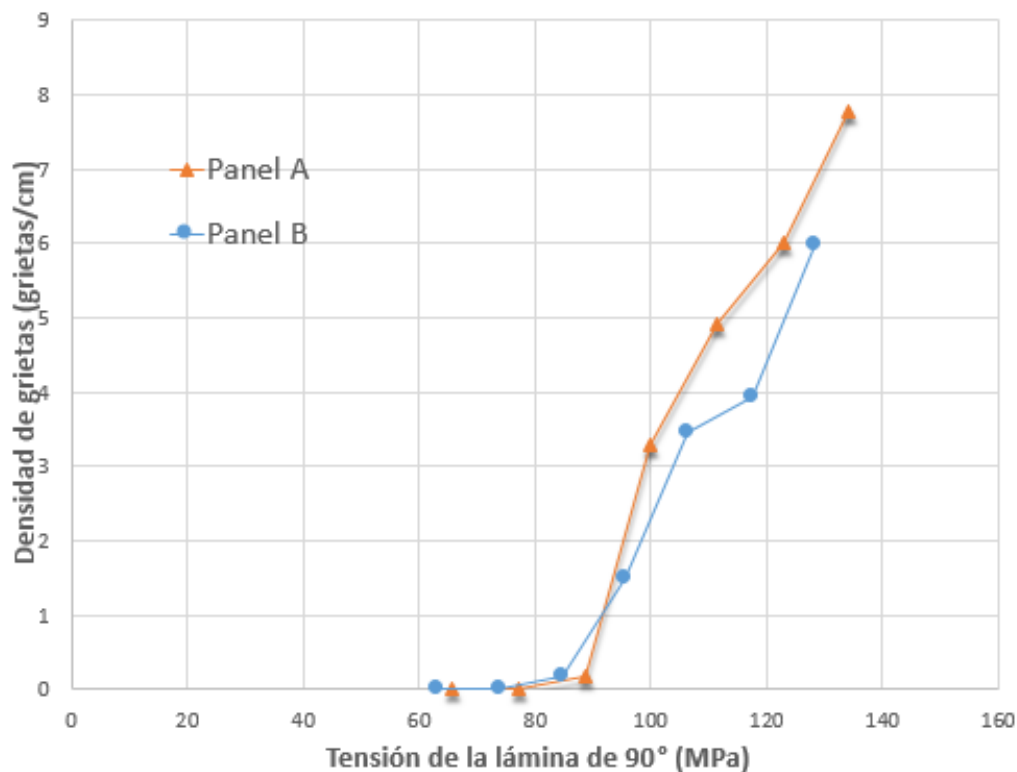


Gráfico 6-5. Densidad de grieta frente a tensión de la lámina a 90 °para el panel A,  $[0_2, 90_2]_s$  y B,  $[0_2, 90_4]_s$

Tal y como se ha observado hasta ahora, para bajos niveles de carga ambas curvas muestran el mismo comportamiento, separándose a partir del momento en que se da el desarrollo de grietas y creciendo rápidamente a partir de este punto. Sin embargo, se da ahora una inversión en la tendencia que no se observaba en los análisis puramente experimentales. Desde la aparición de la primera grieta transversal hasta un porcentaje de la tensión aplicada entre el 50% y el 60% el panel A presenta una densidad de grietas menor que el panel B, tal y como ocurre cuando se compara la densidad de grietas frente a la tensión total que soporta el laminado. Sin embargo, a partir de un punto entre el 50% y el 60% las curvas se cortan y para un mismo nivel de tensión que soporta una lámina de 90° es mayor el daño que aparece en este panel.

A la hora de analizar esta representación no se puede olvidar que mientras que los gráficos anteriores estaban basados únicamente en valores experimentales, este compara datos experimentales (densidad de grietas) con datos teóricos (tensión que soporta cada una de las láminas a 90°). El hecho de que se obtengan valores teóricos muy similares en la tensión que aguanta la lámina de 90° en la aplicación de un determinado porcentaje de carga en un determinado panel ha atenuado el mayor salto de tensión que se sufría al pasar de un porcentaje a otro en el panel A, por lo que al tener un crecimiento de la densidad mayor ha aumentado la pendiente de la curva produciéndose el corte y cambio de tendencia que no se veía en la curva experimental del Gráfico 6-4.

## 6.2 Clasificación de las grietas observadas

En el análisis de las fotocomposiciones se observa la existencia de distintos tipos de grieta cuya identificación y cuantificación ayuda a analizar las fases del daño en cada probeta. En primer lugar, se diferenciará entre grietas transversales, es decir, las que cruzan la sección transversal de lado a lado y cuyo recuento ha sido objeto a estudio en el apartado anterior, y grietas incompletas, es decir, que no ha finalizado su crecimiento, tal y como se muestra en la Figura 6-40. Dentro de las grietas transversales se identificarán dos tipos de grietas que se nombrarán mediante la siguiente nomenclatura: grietas rectas y grietas oblicuas, y dentro de estas, se analizarán si la grieta es continua o existe una zona donde no se ha producido la rotura completa. Se realizará un análisis estadístico de la presencia de estas grietas en las muestras de cada laminado y se comparará.

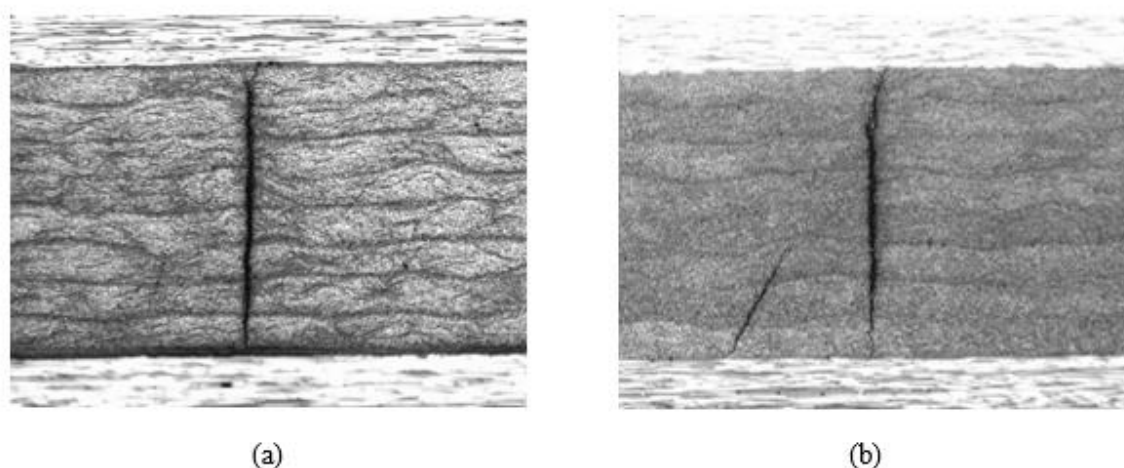


Figura 6-40. Ejemplo de una grieta transversal correspondiente a la muestra 6B (a); Ejemplo de una grieta incompleta al lado de una grieta transversal correspondiente a la muestra 6B (b).

### 6.2.1 Grietas transversales: Diferenciación

#### 6.2.1.1 Recuento de grietas rectas y oblicuas

Tal y como se ha comentado, en el recuento de grietas transversales a x25 se ha realizado una primera clasificación de grietas a grandes rasgos en grietas rectas y grietas oblicuas y se ha procedido a realizar un análisis comparativo de como se desarrolla el crecimiento de cada una de ellas para cada nivel de carga.

En el caso del panel A, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_S$ , únicamente se han observado grietas rectas, tales como las que se muestran en la Figura 6-41, coincidiendo por tanto estas con las grietas transversales cuyo análisis de crecimiento es el descrito en el apartado 6.1.1.

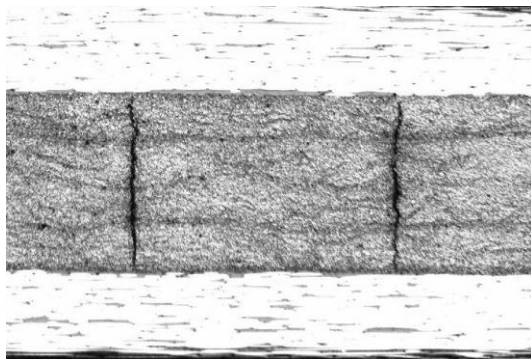
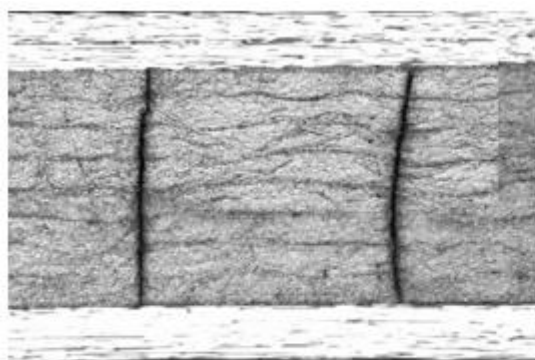
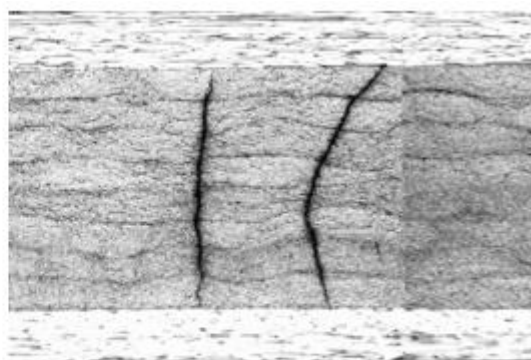


Figura 6-41. Grietas rectas correspondientes a la muestra 9A.

En el caso del panel B, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_S$ , se aprecian los dos tipos de grietas tenidas en cuenta. En la Figura 6-42 aparecen un ejemplo del tipo de grieta que se ha contabilizado como grieta recta y como grieta desviada.



(a)



(b)

Figura 6-32. Ejemplo de dos grietas transversales rectas correspondientes a la muestra 9B (a);  
Ejemplo de una grieta transversal desviada (derecha) al lado de una grieta recta(izquierda)  
correspondiente a la muestra 9B (b).

En primer lugar se ha procedido al recuento de grietas oblicuas y grietas rectas por unidad de longitud para cada una de las muestras ensayadas tal y como se realizó en el recuento de grietas transversales. A continuación se muestra la tabla donde se ha recogido la densidad de grietas rectas y oblicuas de cada probeta, así como la media para cada nivel de carga. En el Anexo C aparece en detalle el recuento de grietas realizado trozo a trozo.



Porcentaje de carga	Muestra	Grietas rectas por cm	Grietas oblicuas por cm
90%	25B	5.97	1.88
	<b>Media</b>	<b>5.97</b>	<b>1.88</b>
80%	6B	3.23	0.65
	7B	3.47	0.55
	8B	2.94	0.98
	9B	3.27	0.76
	10B	2.75	0.99
	<b>Media</b>	<b>3.13</b>	<b>0.79</b>
70%	23B	3.06	0.23
	24B	3.16	0.45
	<b>Media</b>	<b>3.11</b>	<b>0.34</b>
60%	21B	1.655	0
	22B	1.47	0
	<b>Media</b>	<b>1.56</b>	<b>0</b>
50%	11B	0.302	0
	12B	0.187	0
	13B	0.169	0
	14B	0.217	0
	15B	0.0747	0
	<b>Media</b>	<b>0.19</b>	<b>0</b>
40%	18B	0	0
	19B	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
30%	16B	0	0
	17B	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla 6-17. Densidad de grietas rectas y oblicuas en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

#### 6.2.1.1.1 Recuento de grietas rectas y oblicuas: Análisis de resultados

Una vez realizado el recuento de grietas de cada tipo considerado para cada una de las muestras del laminado B, único donde aparecen, se representan estas frente a la tensión máxima soportada por la probeta.

En primer lugar, se procederá exponiendo los resultados obtenidos en el análisis de la evolución en la aparición de grietas rectas. A continuación, se analizará lo observado en el estudio de grietas oblicuas y, por último, se compararán ambos resultados.

En el gráfico 6-7 aparece representada la densidad de grietas rectas (grietas por centímetro) en cada una de las muestras según la tensión máxima soportada. Esta representación es la misma recogida en el gráfico 6-2 donde se muestra la densidad de grietas transversales total, y que, con el objetivo de ver la contribución de cada tipo de grieta identificado al crecimiento total de grietas transversales se rescata en el Gráfico 6-6.

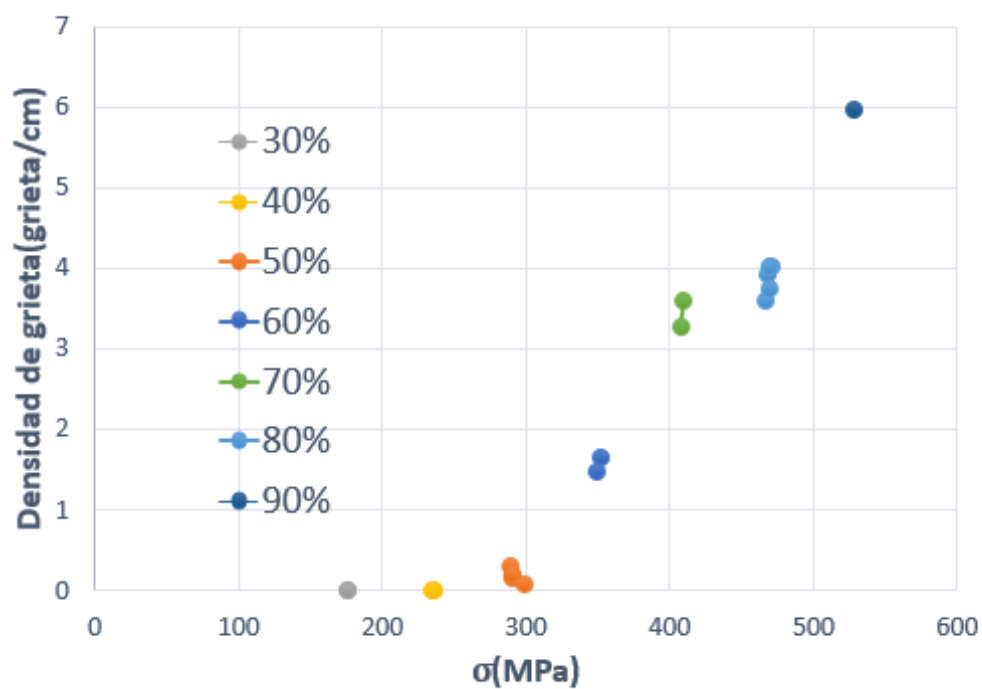


Gráfico 6-6. Evolución del número de grietas transversales por centímetro en función de la tensión aplicada en el panel B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

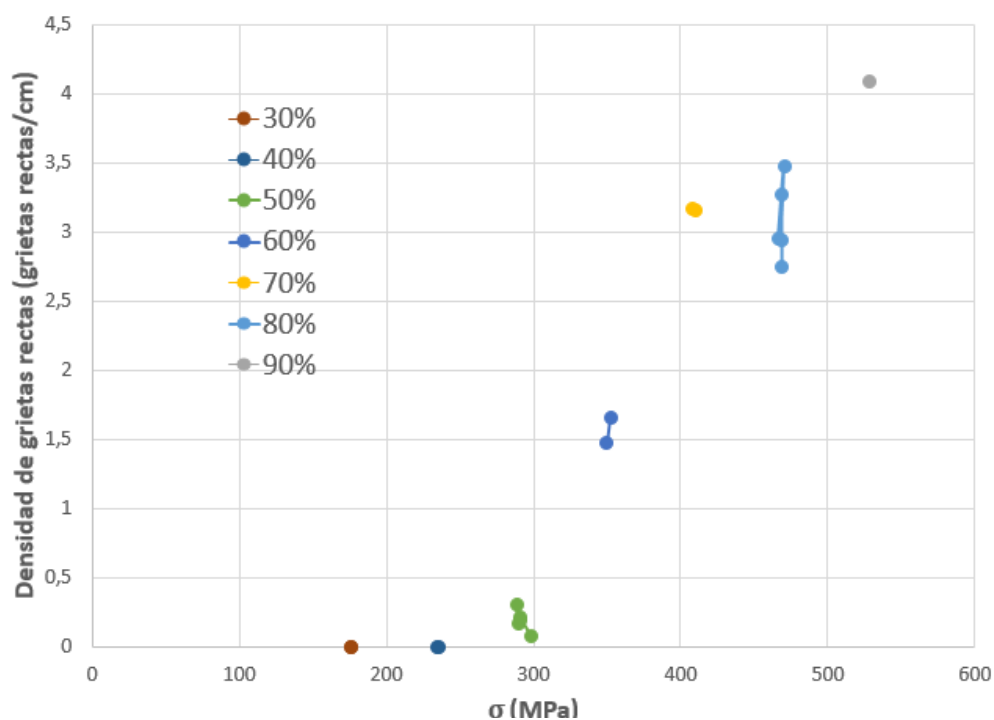


Gráfico 6-7. Evolución del número de grietas rectas por centímetro en función de la tensión aplicada en el panel B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

Si se comparan ambas gráficas se aprecia que hasta el 60% son análogas: la primera grieta aparece para el 50% de la tensión de rotura media y a partir de este punto la tendencia de crecimiento comienza a aumentar manteniéndose la misma densidad de grietas en ambos casos. Sin embargo, a partir del 70% de la tensión media de rotura el comportamiento se aleja ligeramente, ya que a pesar de que ambas experimentan un aumento de pendiente que indica un crecimiento elevado del número de grietas por unidad de longitud, los valores alcanzados por el número de grietas totales supera al de grietas rectas por la aparición de grietas oblicuas. La máxima diferencia existente entre el número de grietas totales y el número de grietas oblicuas es del 35.85%, por tanto la densidad de grietas rectas permanece en todo instante mayor a la densidad de grietas oblicuas.

En el Gráfico 6-8 aparece representada la densidad de grietas oblicuas (grietas por centímetro) en cada una de las muestras según la tensión máxima soportada en el ensayo.

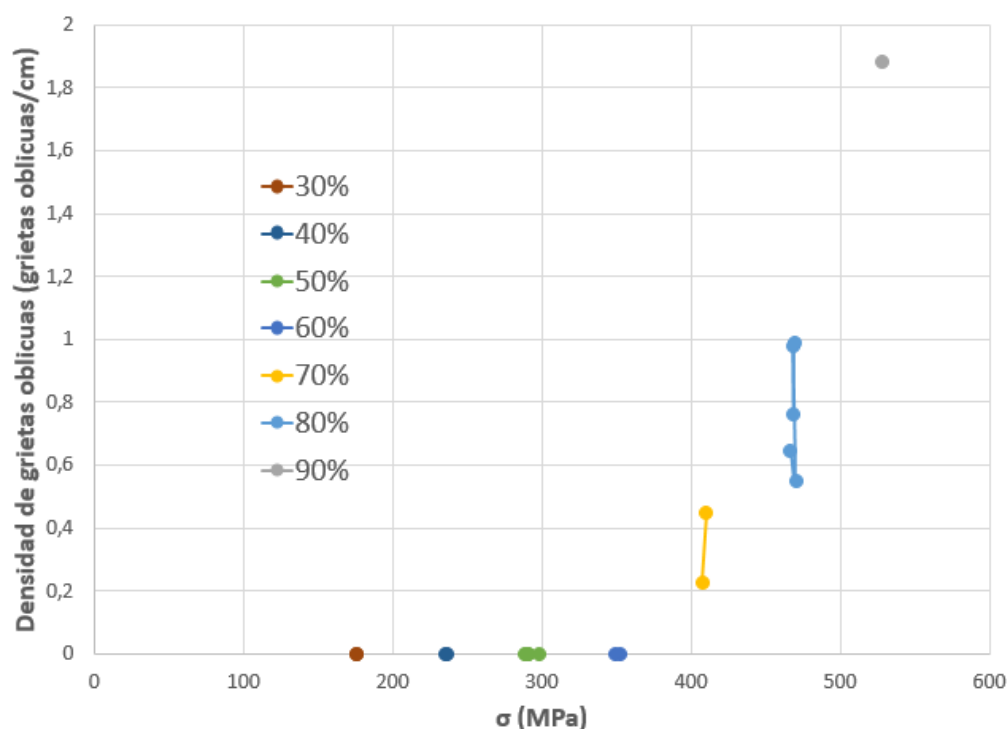


Gráfico 6-8. Evolución del número de grietas oblicuas por centímetro en función de la tensión aplicada en el panel B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

Se puede apreciar que el hecho de que el crecimiento de grietas rectas con el nivel de carga fuera idéntico al crecimiento de grietas totales se debe a que no se aprecian grietas oblicuas hasta un 70% de la carga de rotura. Sin embargo, a partir de este punto experimentan un rápido aumento, llegándose a apreciar una pendiente de crecimiento similar a la de grietas rectas.

Para poder realizar una comparación más visual de este efecto en el Gráfico 6-9 aparece la representación conjunta de la densidad de grietas de cada tipo, ahora en base a los valores medios calculados para cada porcentaje de tensión, frente al porcentaje de la tensión de rotura a la que han sido ensayadas las muestras.

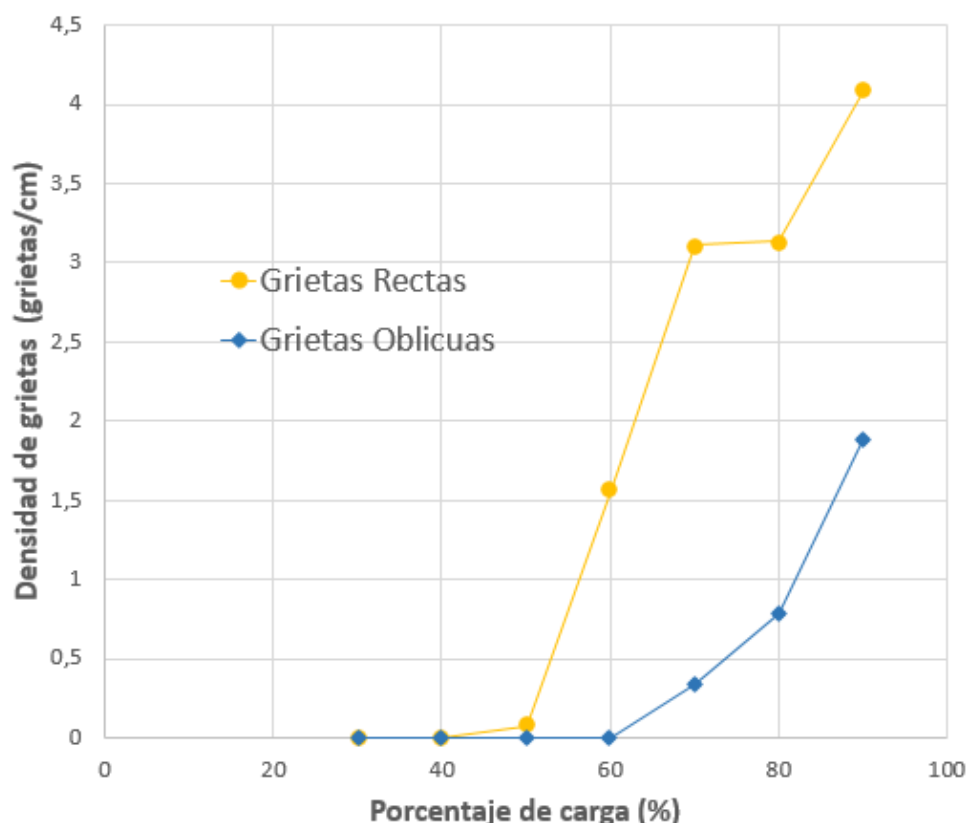


Gráfico 6-9. Evolución del número de grietas rectas y oblicuas por centímetro en función del porcentaje de tensión aplicada en el panel B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

Tal y como se ha comentado, la primera grieta recta aparece para el 50% de la carga de rotura mientras que la primera grieta oblicua no aparece hasta al 70%, donde comienzan a crecer hasta llegar al punto de aumentar tan rápidamente de lo que lo hace el número de grietas rectas, aunque no llega a alcanzar la misma densidad.

Se observa en esta representación un cambio acusado de pendiente en la curva de crecimiento de grietas rectas para un nivel de carga del 70%.

Pasando ahora a las observaciones realizadas en el recuento de grietas oblicuas se ha llegado a la conclusión de que estas aparecen, para todos los casos recogidos, cerca de una grieta transversal, ya sea a la izquierda o a la derecha, y tienen tendencia a acercarse al daño. Es decir, analizando su forma desde los extremos hacia la parte central, se ve como la grieta se aleja de la tendencia recta para acercarse a una grieta transversal cercana. Mientras que para niveles de carga en torno al 70%, donde se aprecian las primeras grietas oblicuas, estas aparecen siempre cerca de una grieta transversal recta, tal y como aparece en la Figura 6-43, se da que para niveles de carga superiores, cercanos a la rotura, aparecen tanto cerca de grietas rectas como cerca de otra grieta desviada rellenando el hueco existente entre dos grietas rectas (para la aplicación del 90% de la tensión media de rotura y alguna observación aislada al 80%, Figura 6-44).

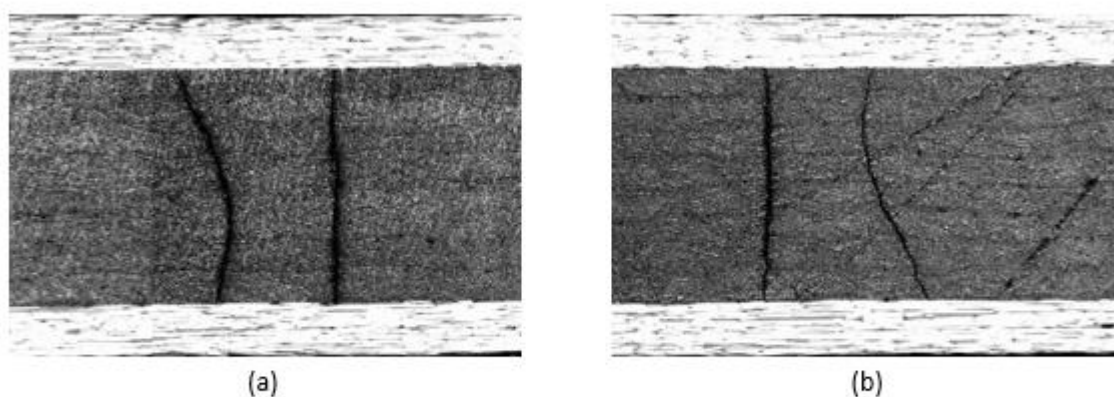


Figura 6-43. Ejemplo de una grieta oblicua a la izquierda de una grieta transversal correspondiente a la muestra 8B (a); Ejemplo de una grieta desviada a la derecha de una grieta transversal correspondiente a la muestra 8B (b).

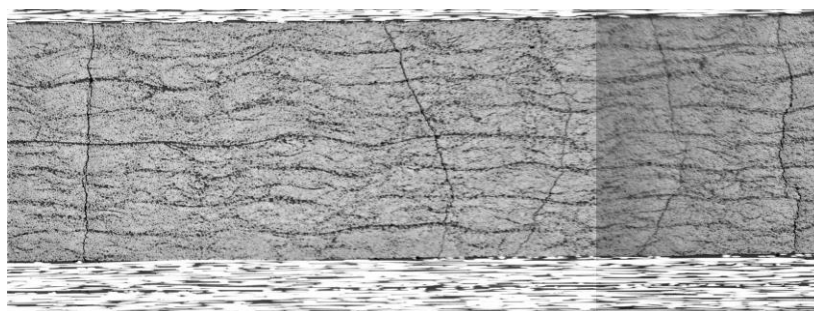


Figura 6-44. Ejemplo de grietas oblicuas entre dos grietas transversales rectas correspondientes a la muestra 25B.

### 6.2.2 Grietas transversales: Recuento de grietas discontinuas.

Como se ha comentado en la introducción del presente capítulo, en el análisis de grietas transversales a x25 se observó, en ambos paneles, que había algunas grietas que parecían no unirse completamente quedando un nexo de unión tal y como aparece en las Figuras 6-45 y 6-46, donde se recogen una serie de ejemplos de muestras del panel A y del panel B que parecen no unirse a simple vista. Tal y como se aprecia, este fenómeno aparece sin distinción en grietas rectas y oblicuas por lo que el estudio realizado en el presente apartado no diferencia entre ambos tipos.

Además, todo apunta a que estas grietas se generan en los extremos de la capa a  $90^\circ$  y no en el centro, de tal manera que están formadas por dos fragmentos de grieta que al crecer de los extremos al centro de la sección no llegan a unirse totalmente.

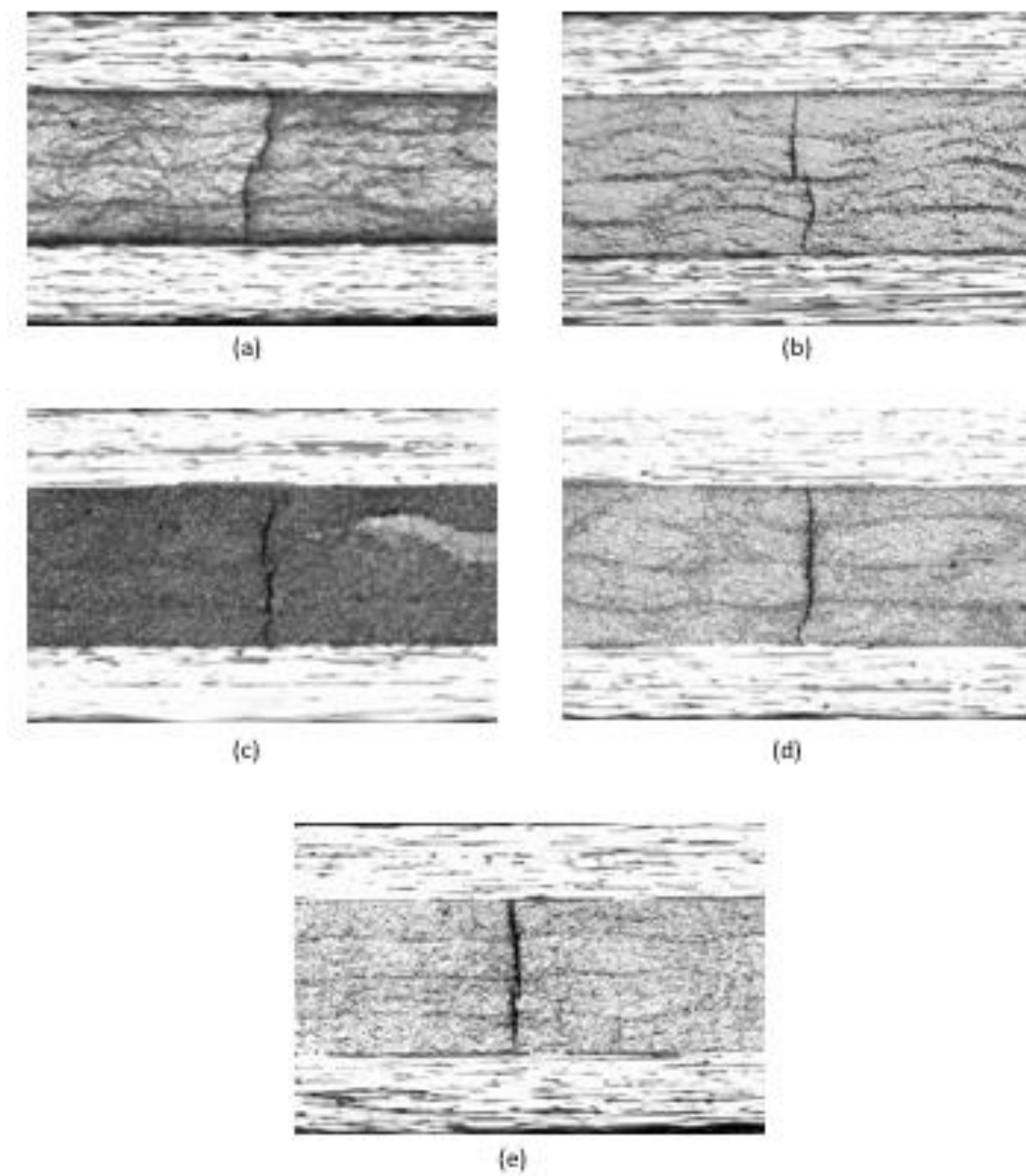


Figura 6-45. Grietas discontinuas visualizadas en las muestras 6A(a); 7A(b); 8A(c); 9A(d); 10A(d).

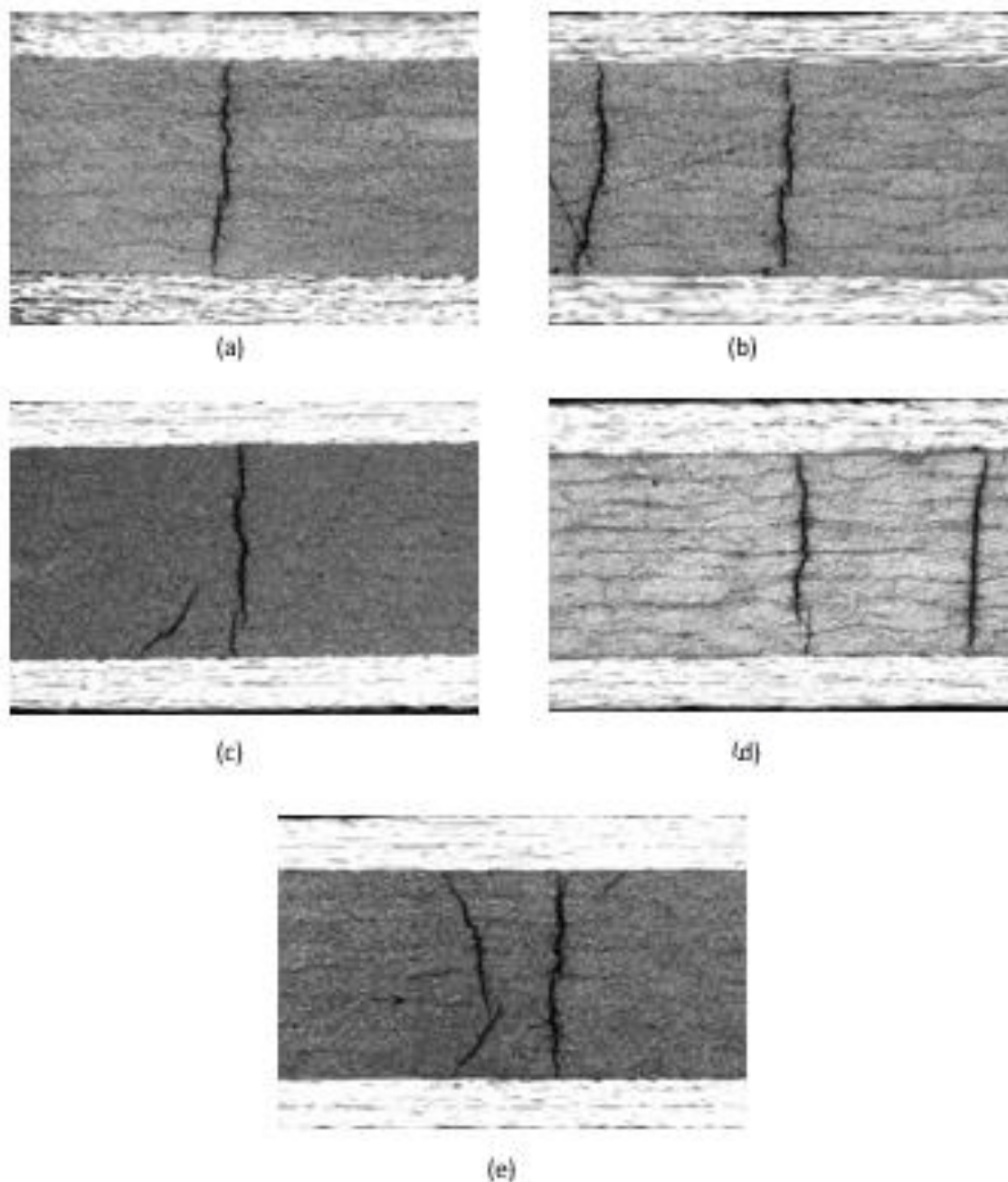


Figura 6-46. Grietas discontinuas visualizadas en las muestras 6B(a); 7B(b); 8B(c); 9B(d); 10B(d).

En la observación a simple vista de las fotocomposiciones, al comparar muestras del panel A ensayadas a un determinado porcentaje de carga de la tensión media de rotura de su panel con muestras del panel B ensayadas al mismo porcentaje de carga, parecía apreciarse un mayor número de grietas discontinuas en el panel A que en el panel B. Con el objetivo de ver si esto se cumplía realmente, y si este hecho podía tener relación con el hecho de que el panel A, al tener un mayor número de grietas que no siguen un camino continuo, resista más que el panel B.

A pesar de que como ya se ha comentado fue la observación a  $\times 25$  lo que llevó al planteamiento de este problema, a este número de aumentos es muy difícil determinar lo que realmente está pasando a nivel de matriz-fibra. Por tanto, para el recuento de grietas discontinuas se decidió realizar un barrido de todas las muestras a  $\times 200$ , donde sí que es posible apreciar el recorrido de la grieta, y, en este barrido, realizar el recuento de grietas que no llegan a unir en cada uno de los paneles. En la Figura 6-47 aparece la visualización de una grieta discontinua a este número de aumentos.

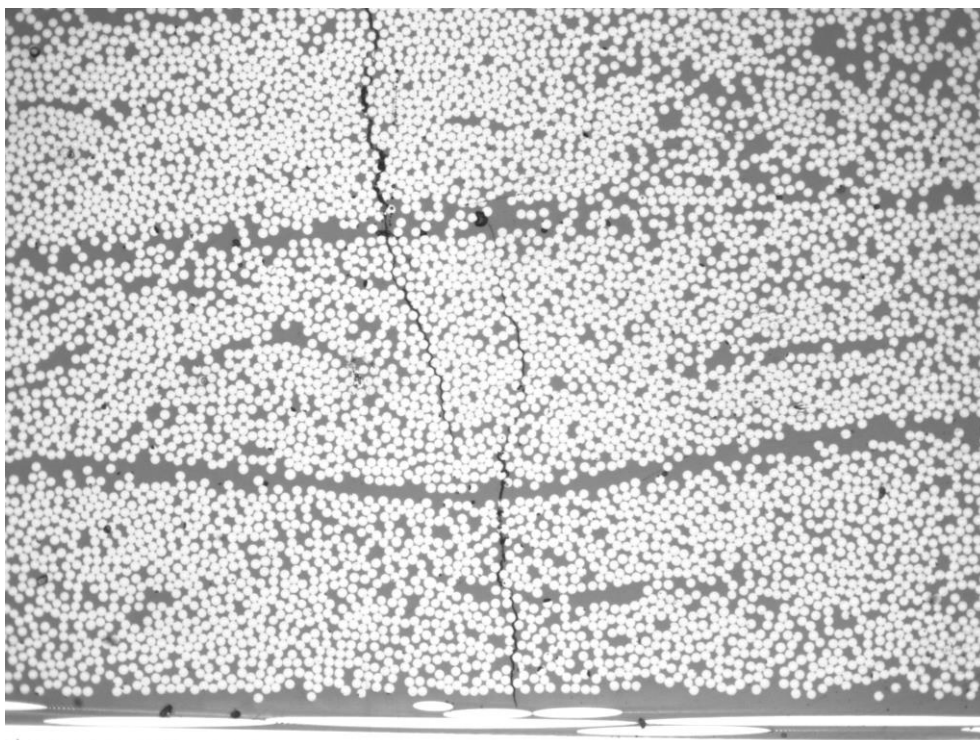


Figura 6-47. Micrografía a x200 aumentos de una grieta discontinua en la muestra 25B.

Las Figuras 6-48 a 6-55 representan un aumento de la zona donde la grieta se hace discontinua tomadas de las micrografías realizadas a x200 aumentos de una muestra ensayada a cada nivel de carga de cada panel.

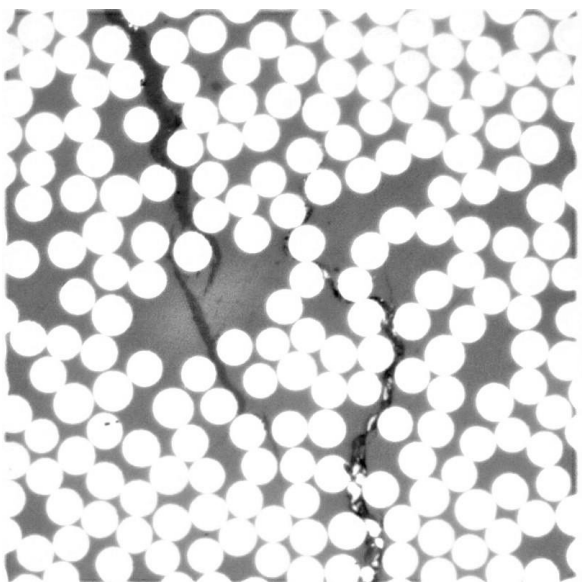


Figura 6-48. Grieta que discontinua en la 11A.

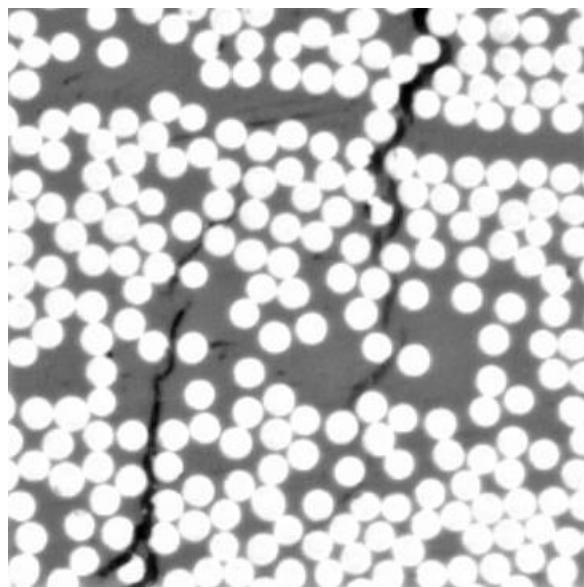


Figura 6-49 . Grieta discontinua en la 21A.



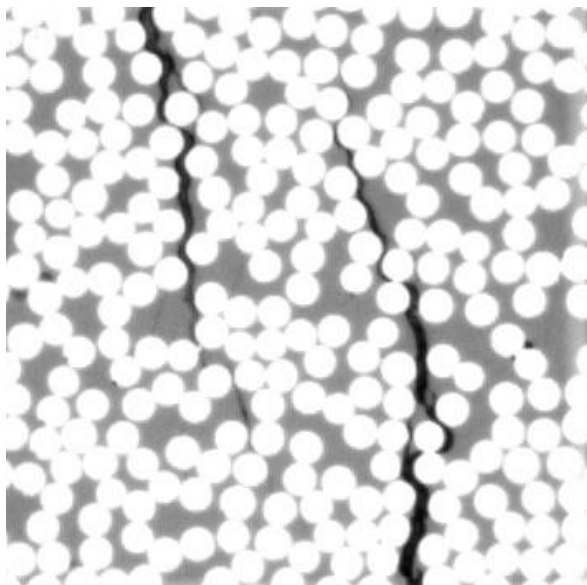


Figura 6-50. Grieta discontinua en la 20A.

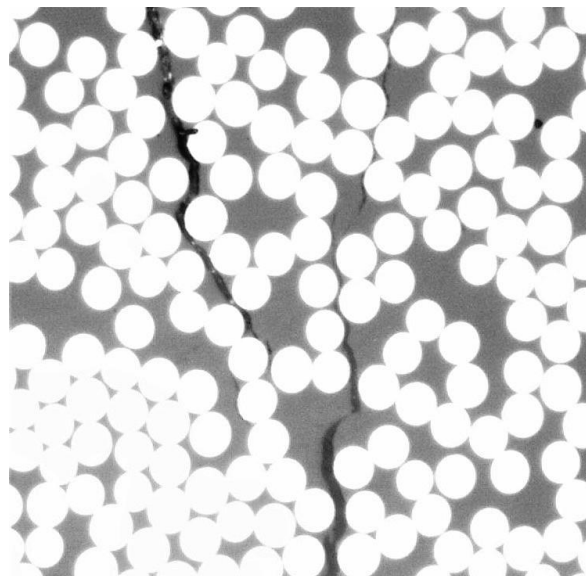


Figura 6-51. Grieta discontinua en la 25A.

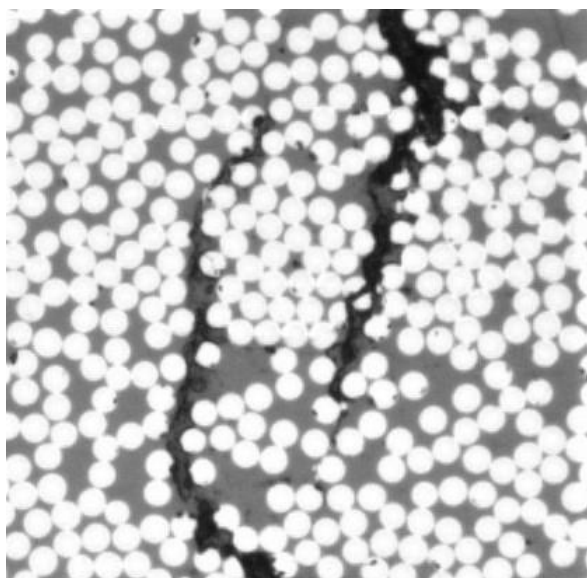


Figura 6-52. Grieta discontinua en la 7B.

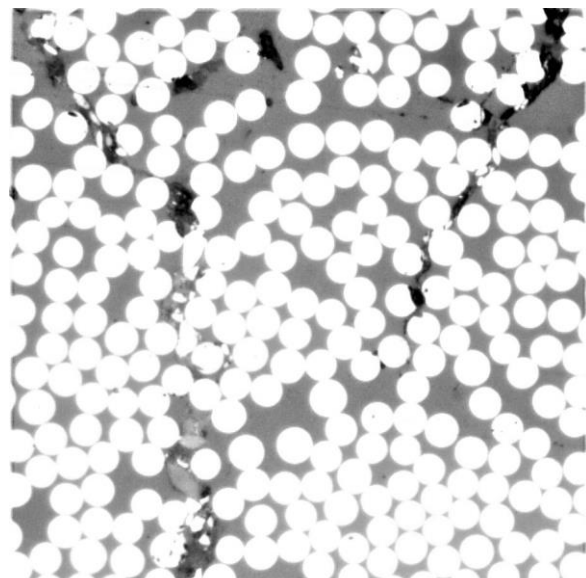


Figura 6-53. Grieta discontinua en la 14B.

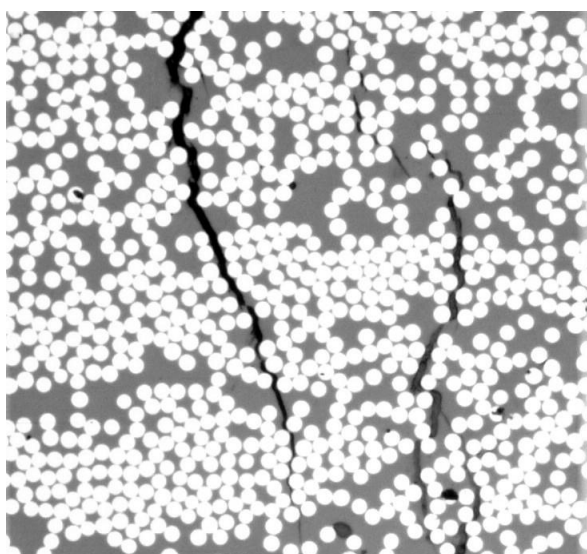


Figura 6-54. Grieta discontinua en la 23B.

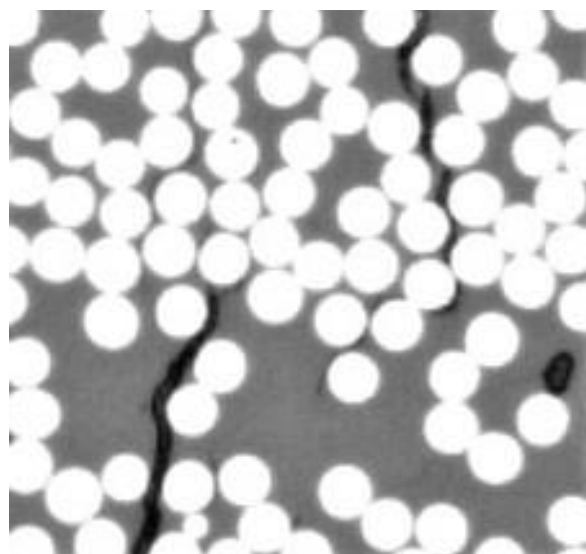


Figura 6-55. Grieta discontinua en la 25B.

Una vez visualizado claramente el defecto bajo análisis en muestras de cada panel correspondientes a cada uno de los porcentajes de carga que se han aplicado, se procede a realizar el recuento de grietas discontinuas por unidad de longitud para cada una de las muestras. En las tablas 6-18 y 6-19 aparece este recuento mediante el número de grietas discontinuas por centímetro para el panel A y B respectivamente. Se incluyen también el número de grietas continuas, el número de grietas totales y el porcentaje de estas que suponen las grietas que no llegan a unir respecto de las grietas totales.

Porcentaje de carga	Muestra	Grietas discontinuas por cm	Grietas discontinuas por cm	Grietas totales por cm	Porcentaje de grietas discontinuas respecto a las totales (%)
<b>90%</b>	25A	3.08	4.7	7.78	39.59
	<b>Media</b>	<b>3.08</b>	<b>4.7</b>	<b>7.78</b>	<b>39.59</b>
<b>80%</b>	6A	1.88	4.29	6.17	30.47
	7A	2.01	4.39	6.4	31.4
	8A	2.30	4.21	6.51	35.33
	9A	0.954	4.696	5.65	16.88
	10A	1.18	4.09	5.27	22.39
	<b>Media</b>	<b>1.66</b>	<b>4.34</b>	<b>6</b>	<b>27.67</b>
<b>70%</b>	20A	1.91	2.74	4.65	41.07
	24A	1.68	3.73	5.41	31.05
	<b>Media</b>	<b>1.79</b>	<b>3.24</b>	<b>5.03</b>	<b>35.59</b>
<b>60%</b>	21A	0.83	3.43	4.26	19.48
	22A	0.1	2.225	2.325	4.3
	<b>Media</b>	<b>0.47</b>	<b>2.82</b>	<b>3.29</b>	<b>14.28</b>
<b>50%</b>	11A	0.091	0.092	0.183	49.73
	12A	0.202	0.102	0.304	66.44
	13A	0	0.231	0.231	0
	14A	0	0.153	0.153	0
	15A	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0.059</b>	<b>0.111</b>	<b>0.17</b>	<b>33.87</b>
<b>40%</b>	18A	0	0	0	0
	19A	0.106	0	0.106	100
	<b>Media</b>	<b>0.053</b>	<b>0</b>	<b>0.053</b>	<b>100</b>
<b>30%</b>	16A	0	0	0	0
	17A	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla 6-18. Recuento de grietas que unen y discontinuas para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

Porcentaje de carga	Muestra	Grietas discontinuas por cm	Grietas discontinuas cm	Grietas totales por cm	Porcentaje de grietas discontinuas respecto a las totales (%)
<b>90%</b>	25B	2.83	3.14	5.97	52.59
	<b>Media</b>	<b>2.83</b>	<b>3.14</b>	<b>5.97</b>	<b>47.4</b>
<b>80%</b>	6B	1.02	2.58	3.6	28.3
	7B	1.37	2.65	4.02	34.08
	8B	0.9	3.02	3.92	22.96
	9B	1.07	2.965	4.035	26.62
	10B	1.22	2.64	3.86	31.6
	<b>Media</b>	<b>1.12</b>	<b>2.77</b>	<b>3.89</b>	<b>28.79</b>
<b>70%</b>	23B	0.98	2.3	3.28	29.88
	24B	1.13	2.32	3.45	32.75
	<b>Media</b>	<b>1.055</b>	<b>2.355</b>	<b>3.365</b>	<b>31.35</b>
<b>60%</b>	21B	0.11	1.545	1.655	19.48
	22B	0.24	1.23	1.47	4.3
	<b>Media</b>	<b>0.18</b>	<b>1.389</b>	<b>1.569</b>	<b>11.47</b>
<b>50%</b>	11B	0	0.302	0.302	0
	12B	0	0.187	0.187	0
	13B	0	0.169	0.169	0
	14B	0.145	0.072	0.217	66.82
	15B	0	0.0747	0.0747	0
	<b>Media</b>	<b>0.029</b>	<b>0.161</b>	<b>0.19</b>	<b>13.37</b>
<b>40%</b>	18B	0	0	0	0
	19B	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>30%</b>	16B	0	0	0	0
	17B	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla 6-19. Recuento de grietas que unen y discontinuas para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Teniendo en cuenta el porcentaje medio de grietas discontinuas que aparece a cada nivel de carga se deduce que el número de grietas discontinuas no tiene relación con el nivel de carga, ya que no se da que conforme aumente la carga el porcentaje de estas con respecto a las totales disminuya en ninguno de los dos paneles ni ningún otro tipo de patrón.

Para obtener una visualización más gráfica de este fenómeno en el Gráfico 6-10 se ha hecho una representación del número de grietas discontinuas por unidad de longitud de cada panel frente a la tensión media aplicada, observándose que la densidad de grietas discontinuas para un mismo nivel de tensión en el panel B es mayor que en el panel A, pero que al ser este más resistente llega a un mayor número de grietas discontinuas. Esto hace pensar que al contrario de lo que se pensó en un primer momento este tipo de daño no está relacionado con la mayor resistencia del panel A.

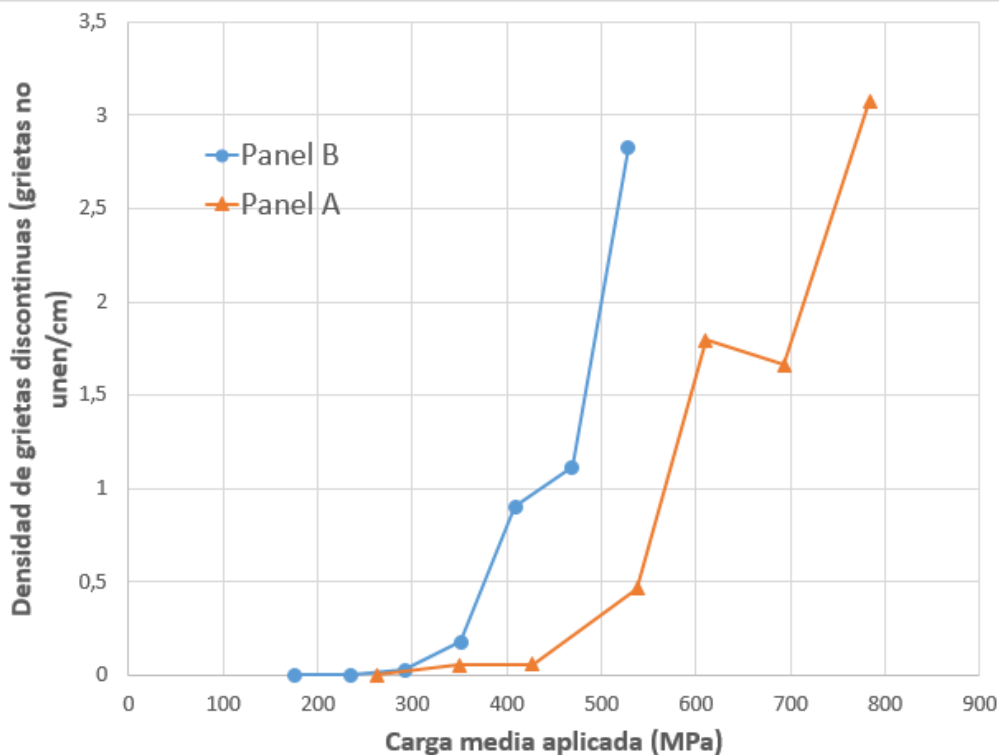


Gráfico 6-10. Densidad de grietas discontinuas frente a tensión media aplicada para el panel A,  $[0_2, 90_2]_s$ , y B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

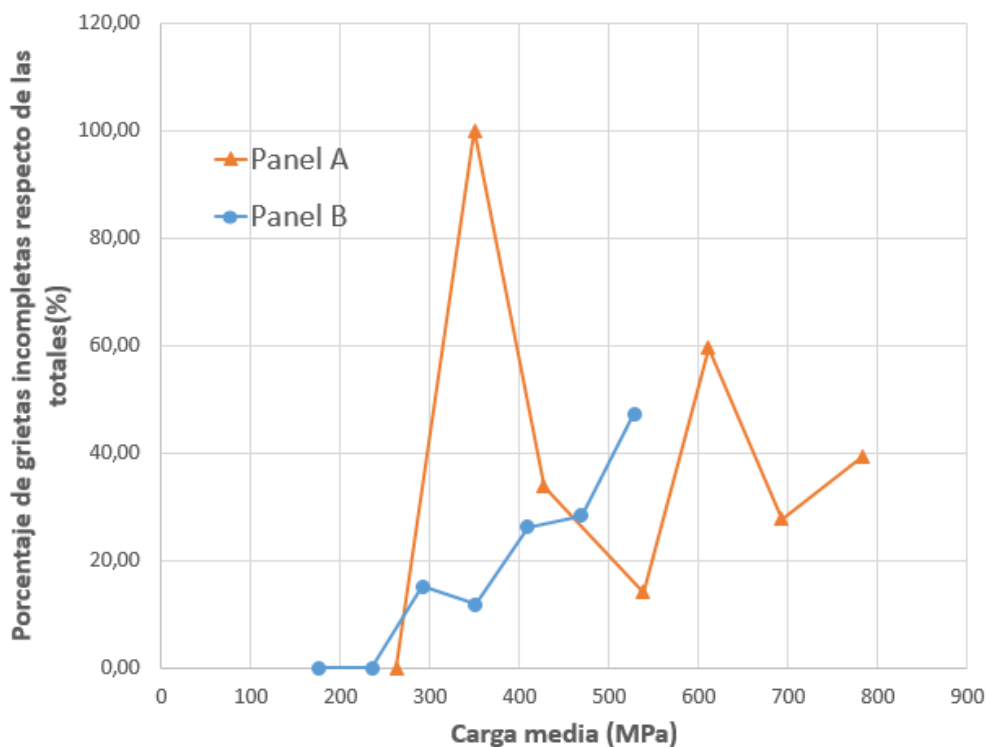


Gráfico 6-11. Porcentaje de grietas discontinuas respecto de las totales frente a tensión media aplicada para el panel A,  $[0_2, 90_2]_s$ , y B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

Para ver esto claramente en el Gráfico 6-11 se representa el porcentaje de grietas incompletas respecto del total de grietas que aparece en cada panel en función de la tensión aplicada.

Se puede apreciar, que efectivamente para el 90% de la tensión media de rotura del panel B el porcentaje de grietas incompletas respecto del total es mayor que el porcentaje de grietas incompletas del panel A al 90% de la carga de rotura, correspondiéndose estos valores con el último marcador de cada gráfico a pesar de que este se represente en MPa.

En la comparación de la curva de crecimiento de grietas incompletas respecto a la total para ambos paneles cabe destacar que al contrario de lo que se vislumbró en un primer momento, no siempre es mayor el porcentaje de grietas incompletas en el panel B, si no que se observan varios tramos. En un primer momento el porcentaje de grietas incompletas es mayor en el panel B, pero al llegar 40% de la carga de rotura del panel A, la curva correspondiente sufre un gran aumento que hace que se invierta esta tendencia. Al 40% de la carga media de rotura del panel A se observa el máximo pico alcanzado pues, cabe recordar, de la probeta A solo se ensayaron dos muestras y la única grieta observada en ellas se corresponde con una grieta que no une. La densidad de grietas incompletas se mantiene superior en el panel A hasta que en torno al 80% de la tensión de rotura del panel B la tendencia se vuelve a invertir y se mantiene hasta el final.

En conclusión, el hecho de que no exista un patrón claro hace que no se pueda establecer una relación entre el número de grietas que no une y la resistencia de cada panel.

### 6.2.3 Grietas incompletas

Una vez realizado un análisis completo de las grietas transversales que aparecen en cada panel en la escala que nos ocupa se pasa a realizar el mismo tipo de análisis estadístico con el otro tipo de grietas observada: grietas que han iniciado su crecimiento pero no han llegado a completarlo tal y como se muestra en la Figura 6-56.

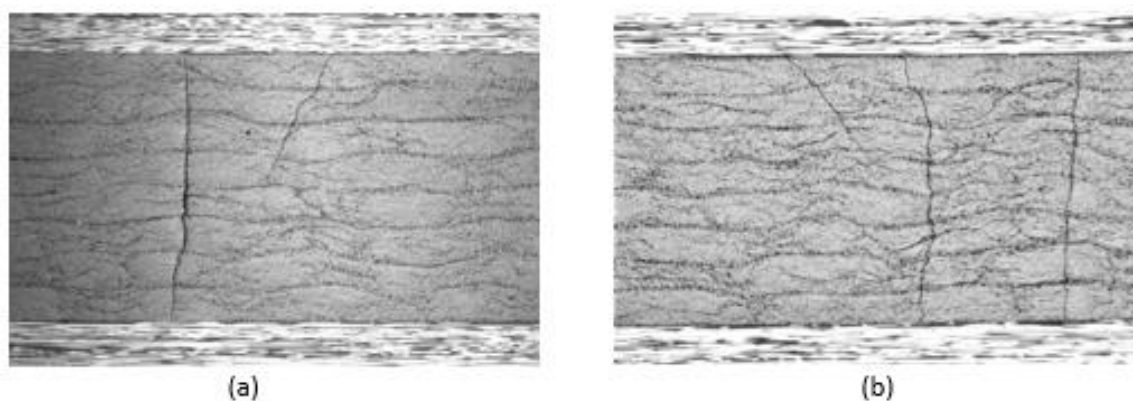


Figura 6-56. Grietas incompletas correspondiente a la muestra 23B(a); 25B(b).

A pesar de que algunas de estas grietas se observan en el recorrido de las muestras a x25 aumentos, al realizar un segundo barrido a un mayor número de aumentos se observó que no todas las grietas que inician su recorrido y no terminan se aprecian en la fotocomposición, ya sea por ser demasiado finas o demasiado cortas. Además, hay ocasiones en las que a este nivel un rayón pudiera ser confundido con una grieta.

Por tanto, y con el objetivo de no incluir en el recuento alguna grieta que no termine o incluir un rayón que a simple vista parezca una grieta en la fotocomposición, se realizó un segundo barrido a x200 al igual que en la búsqueda de grietas discontinuas. A estos aumentos ya se puede apreciar la muestra a nivel de fibra-matriz por lo que permite distinguir si hay algún daño que borde o rompa la fibra y si lo hay, distinguirlo de un posible rayón.

En las Figuras 6-57 a 6-60 aparecen una serie de ejemplos de este daño a un mayor número de aumentos.

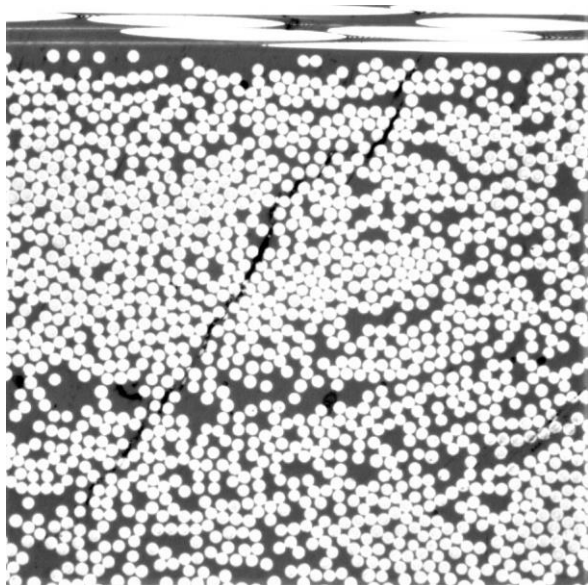


Figura 6-57. Grieta incompleta en la 22A.

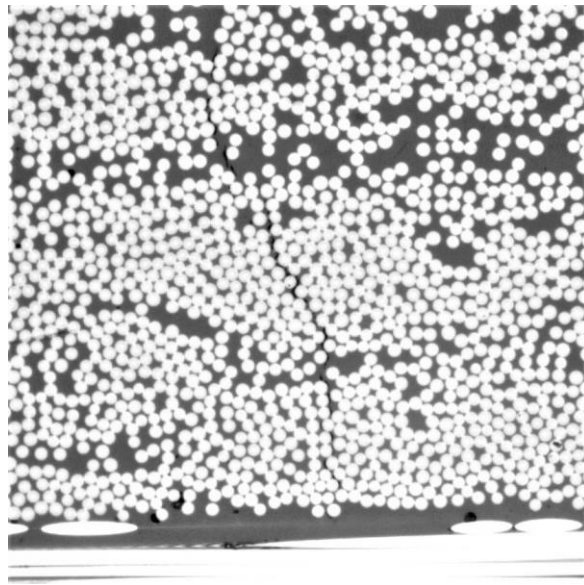


Figura 6-58. Grieta incompleta en la 24A.

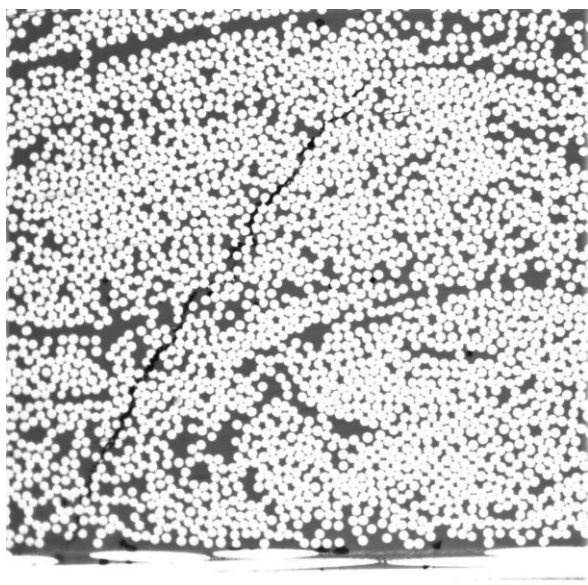


Figura 6-59. Grieta incompleta en la 23B.

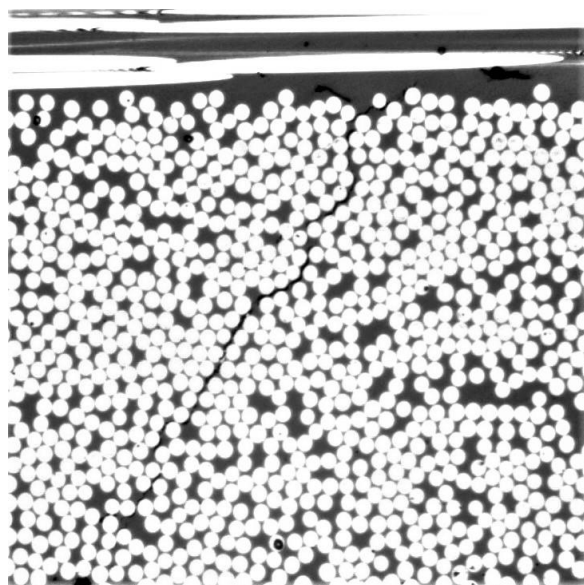


Figura 6-60. Grieta incompleta en la 25B.

En el análisis de inicio y desarrollo de este tipo de grietas para cada panel se expone la tabla de densidad de grietas (grieta/centímetro) para cada una de las muestras.

Porcentaje de carga	Muestra del Panel A [0 <sub>2</sub> , 90 <sub>2</sub> ] <sub>S</sub>	Grietas incompletas por cm	Muestra del Panel B [0 <sub>2</sub> , 90 <sub>4</sub> ] <sub>S</sub>	Grietas incompletas por cm
90%	25A	0.288	25B	2.41
	<b>Media</b>	<b>0.288</b>	<b>Media</b>	<b>2.41</b>
80%	6A	0.268	6B	1.11
	7A	0.274	7B	1
	8A	0.306	8B	0.905
	9A	0.0734	9B	0.914
	10A	0.0787	10B	0.763
	<b>Media</b>	<b>0.2</b>	<b>Media</b>	<b>0.939</b>
70%	20A	0	23B	0.453
	24A	0.36	24B	0.451
	<b>Media</b>	<b>0.18</b>	<b>Media</b>	<b>0.452</b>
60%	21A	0	21B	0.22
	22A	0	22B	0.122
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>Media</b>	<b>0.171</b>
50%	11A	0	11B	0
	12A	0	12B	0
	13A	0	13B	0
	14A	0	14B	0
	15A	0	15B	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>Media</b>	<b>0</b>
40%	18A	0	18B	0
	19A	0	19B	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>Media</b>	<b>0</b>
30%	16A	0	16B	0
	17A	0	17B	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>Media</b>	<b>0</b>

Tabla 6-20. Densidad de grietas incompletas (grietas/cm) para el panel A, [0<sub>2</sub>, 90<sub>2</sub>]<sub>S</sub>, y para el panel B, [0<sub>2</sub>, 90<sub>4</sub>]<sub>S</sub>.

Para bajos niveles de carga, es decir, del 50% de la tensión media de rotura hacia abajo, no se aprecia ninguna grieta que no complete su recorrido a través de la sección de las láminas a 90°. Conforme aumenta el nivel de carga se puede apreciar que en el primer panel en el que se ve este tipo de daño es el B, apareciendo para un 60% y que, a pesar de que también aparezca en el panel A, en este la densidad de grietas incompletas es menor en todo momento.

Para obtener una imagen mas visual de lo recogido en la tabla 6-20, en el Gráfico 6-12 se muestra la densidad de grietas de cada panel frente al porcentaje de su propia tensión de rotura aplicado.

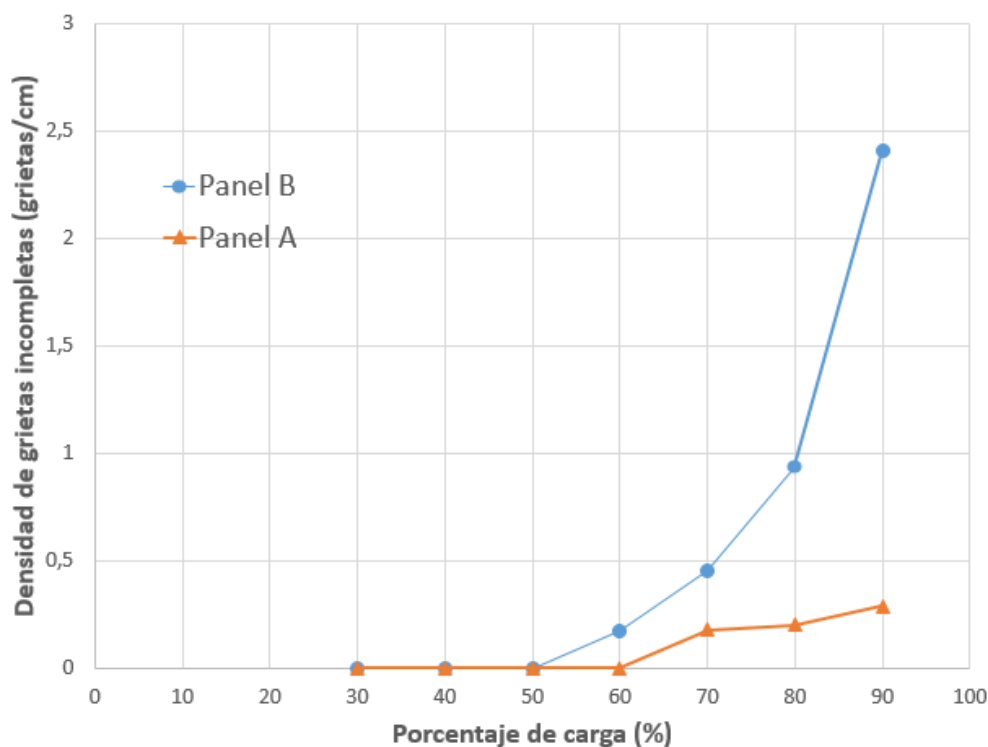


Gráfico 6-12. Densidad de grietas incompletas frente a porcentaje de carga aplicada para el panel A,  $[0_2, 90_2]_s$ , y B,  $[0_2, 90_4]_s$ .

En el gráfico 6-13 se recoge la representación análoga pero teniendo ahora en cuenta la tensión máxima media sufrida por las muestras ensayadas a cada nivel de carga.

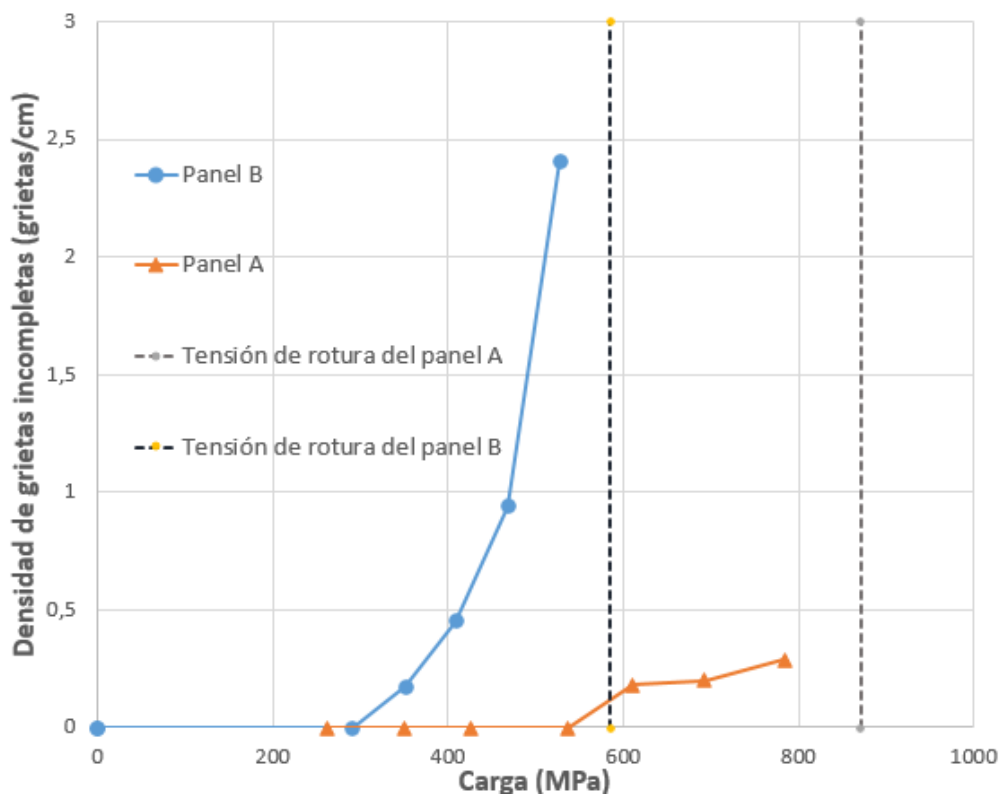


Gráfico 6-13. Densidad de grietas incompletas frente a porcentaje de carga aplicada para el panel A,  $[0_2, 90_2]_s$ , y B,  $[0_2, 90_4]_s$ .



Se aprecia en la representación de valores medios que la densidad de grietas discontinuas, al igual que la densidad de grietas trasnversales, es creciente con la tensión. En la comparación entre los paneles de menor a mayor nivel de tensión se aprecia la siguiente evolución:

- Para el panel A la primera grieta discontinua aparece para un nivel de tensión en el que se ha superado la tensión de rotura del panel B, de 585.15 MPa .
- La pendiente de crecimiento del panel B, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_S$ , es mucho más acusada que la que sufre el panel A, con secuencia  $[0_2, 90_2]_S$ . Además, esta pendiente aumenta conforme aumenta el nivel de tensión aplicado.
- El nivel de grietas discontinuas alcanzado es muy inferior en el panel A, llegando a ser en el panel B de 8.5 veces mayor.

A la hora de relacionar los resultados analíticos obtenidos con lo observado en las fotocomposiciones, resulta de interés analizar la tendencia de estas grietas incompletas. En el caso del panel A, casi todas las grietas discontinuas que aparecen son demasiado pequeñas para verse en la fotocomposición, y las que se ven no llegan a alcanzar grandes tamaños. La grieta incompleta más grande observada en el panel A aparece en la Figura 6-61. Con respecto a la tendecia de estas grietas, es decir, si estas rectas tienen tendencia a seguir rectas o a desviarse, en el recuento realizado se han observado grietas de los dos tipos, con tendencia recta (Figura 6-62) y con tendencia oblicua (Figura 6-63).

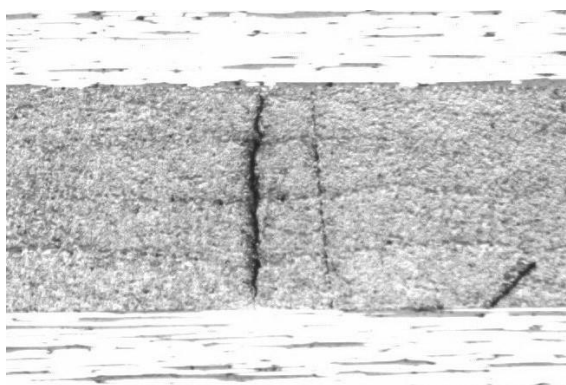


Figura 6-61. Grieta que no termina en la muestra 10A.

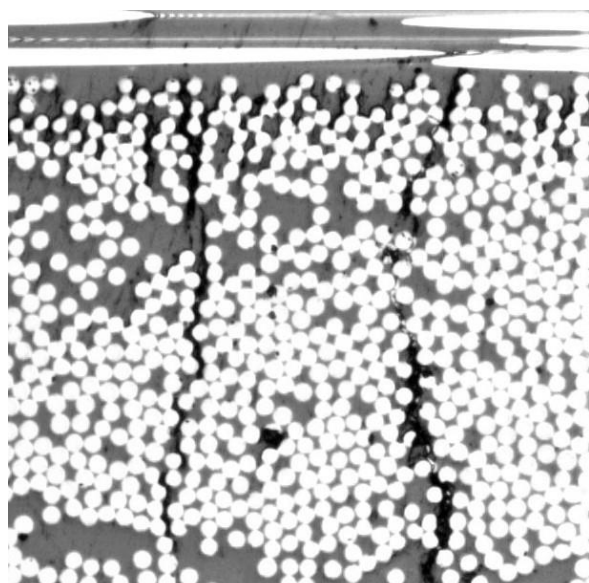


Figura 6-62. Grieta que no termina de la 7A

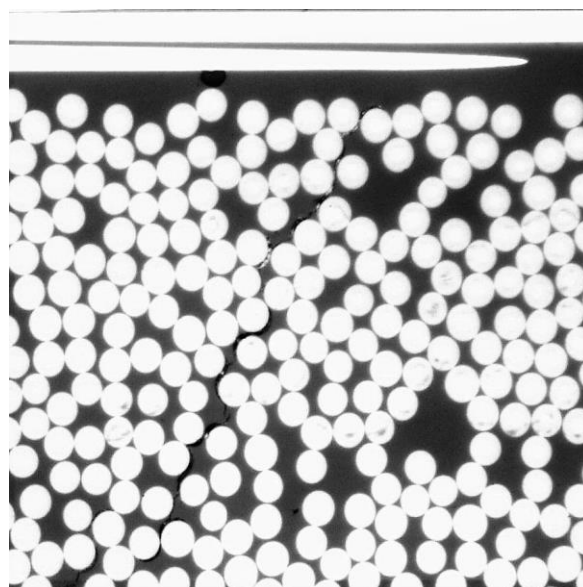


Figura 6-63. Grieta que no termina en la 25A.

En el caso del panel B, cualitativamente se aprecia que el tamaño alcanzado por estas grietas es mayor que en los análisis realizados en el panel A, tal y como se muestra en la Figura 6-64.

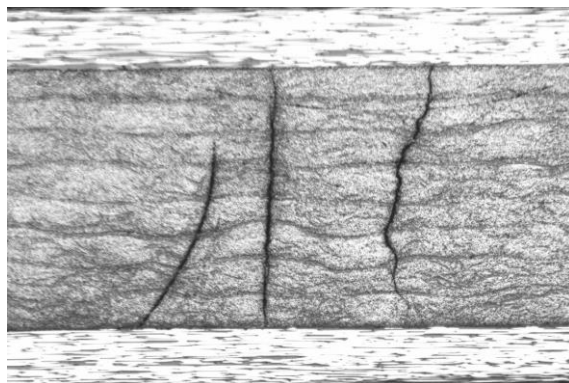


Figura 6-64. Grieta incompleta en la muestra 6B.

Por otro lado, en el estudio de la tendencia seguida por las grietas incompletas se observa que a pesar de que se dan los dos tipos existe en el panel B una tendencia claramente mayor de grietas que tienden a inclinarse. Esta tendencia puede relacionarse con la existencia de grietas oblicuas en este panel. En la observación realizada a  $\times 25$  se ve que a altos niveles de carga (90% de la tensión media de rotura) aparecen múltiples grietas discontinuas completando el hueco entre dos grietas transversales rectas, tal y como lo hacen las oblicuas, pero que no han completado su camino hasta llegar a unir. Este fenómeno puede observarse en la Figura 6-65.

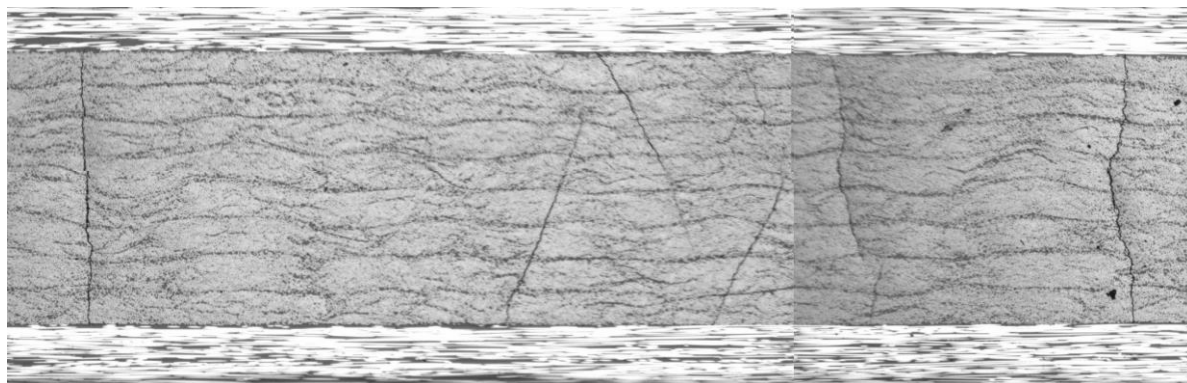


Figura 6-65. Grietas discontinuas inclinadas entre dos grietas rectas en la muestra 25B.

Los resultados aquí obtenidos casan con lo recogido en el artículo *Experimental and numerical study of oblique transverse cracking in cross-ply laminates under tension*, donde se estudia la aparición de grietas oblicuas como segundo modo de fallo. La aparición de grietas transversales en las laminas a  $90^\circ$  en la dirección perpendicular a la aplicación de la carga como primer mecanismo de fallo en laminados *cross-ply* sometidos a tensión está ampliamente aceptado, pero no existe el mismo acuerdo sobre el segundo modo de fallo. Aunque la mayor parte de los resultados analíticos y experimentales se basan en la delaminación introducida por las grietas transversales, la cual se estudiará en el capítulo 7, otro tipo de daño ha sido observado como segundo modo de fallo en laminados  $[0,90_4]_S$ , muy similar al panel B bajo estudio, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_S$  y fabricados con un pre-preg de resina epoxy Hexceek IM//8552. Parece observarse en este estudio, tal y como sucede con el panel B bajo análisis, que para altos niveles de carga la alta tensión aplicada tiende a convertir el modo de fallo de grietas perpendiculares a la dirección de la carga a grietas oblicuas [7].

## 7 INSPECCIÓN MICROSCÓPICA: OBSERVACIONES A ESCALA MICRO

Una vez ha quedado caracterizado el daño en lo que se ha llamado escala meso, se pasa a un análisis más profundo, ya a un número de aumentos que permita distinguir claramente la fibra de la matriz y visualizar cómo se ha producido la rotura con más detalle. El presente capítulo se centrará en describir y clasificar los distintos tipos de fallo que se han encontrado en las muestras al barrerlas con el microscopio a x500 y x1000, identificando el nivel de tensión para el que aparecen para cada laminado y su evolución, ya sea mediante estudios estadísticos como los realizados en el apartado anterior o cualitativamente. Una vez hecho esto se compararán los resultados obtenidos para ambos paneles.

Los principales tipos de daño que serán objeto son: las delaminaciones que se producen en cada muestra entre las láminas a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  respecto la dirección de aplicación de la carga, daño alrededor de la grieta y daño en la sección a  $90^\circ$  respecto a la dirección de aplicación de la carga.

Una vez determinado el daño a esta escala y sus posibles implicaciones en la resistencia, se analiza el posible efecto que haya podido tener el ciclo lijado y pulido al que han sido sometidas las muestras.

### 7.1 Delaminación: Análisis estadístico y cuantificación

Tal y como se introdujo en el capítulo 2, resultados de diversos estudios establecen que el primer modo de fallo en un laminado de láminas orientadas a  $90^\circ$  respecto a la dirección de aplicación de la carga son las grietas transversales en estas láminas. Cuando estas grietas alcanzan la interfaz con la capa vecina, que en los laminados bajo estudio está a  $0^\circ$ , pueden ocasionar la bifurcación de la grieta que se desarrollará ahora como una grieta de delaminación entre las dos capas (la de las láminas a  $0^\circ$  y las láminas a  $90^\circ$ ) [4].

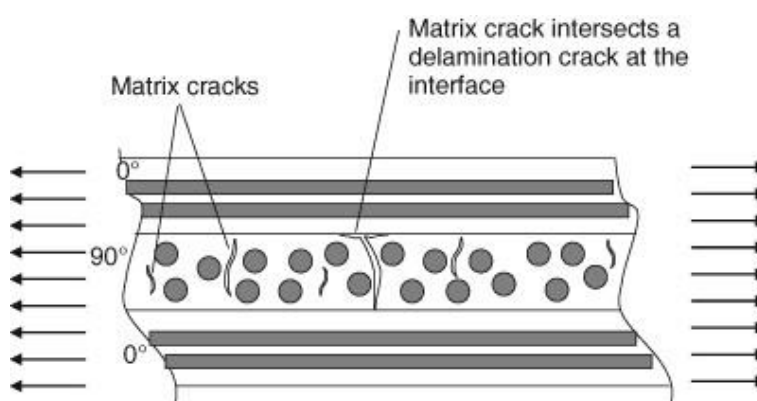


Figura 7-1. Representación gráfica de una delaminación en un laminado  $[0,90]_5$ .

Sin embargo, en la observación de las muestras bajo análisis también se han observado delaminaciones que no están al final de una grieta transversal, si no que aparecen en el hueco entre dos grietas transversales. Esto permite hacer una primera clasificación de las delaminaciones en delaminaciones al final de una grieta y delaminaciones lejos de una grieta transversal, tal y como se nombrarán en adelante. Las Figuras 7-2 a 7-5 muestran el tipo de fallo contabilizado como delaminación lejos de una grieta transversal. Estas imágenes se corresponden con micrografías realizadas en el laboratorio a x500 y x1000 que han sido ampliadas para enfocar la zona del daño con cuidado de mantener la escala que permite obtener una idea gráfica de las

medidas que se están manejando. Las imágenes que presentan escala a 50 micras han sido recortadas de micrografías a x500, mientras las que presentan la escala a 20 micras han sido realizadas a x1000. Se procederá de igual forma en la exposición de micografías en el resto de apartados. La nomenclatura seguida en el análisis realizado para este tipo de delaminación será delaminación lejos de una grieta transversal.

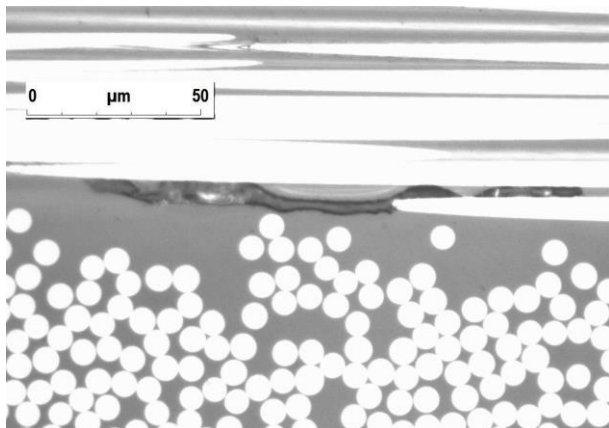


Figura 7-2. Delaminación en la 13A, ensayo al 50%.

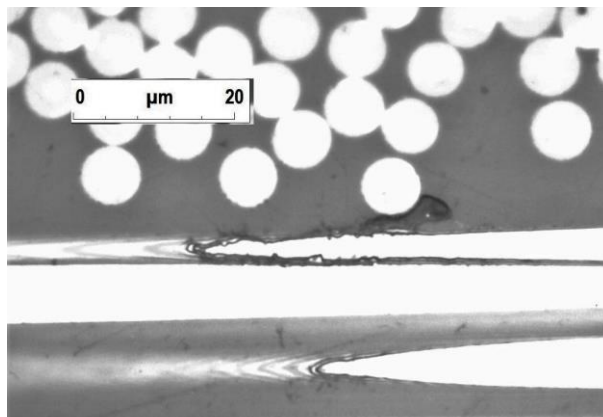


Figura 7-3. Delaminación en la 22A, ensayo al 60%.

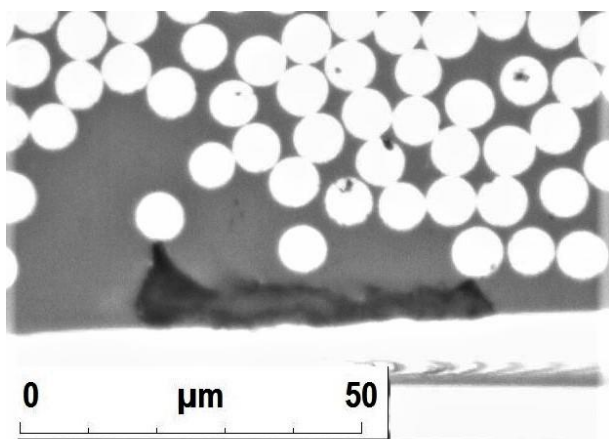


Figura 7-4. Delaminación en la 13B, ensayo al 50%.

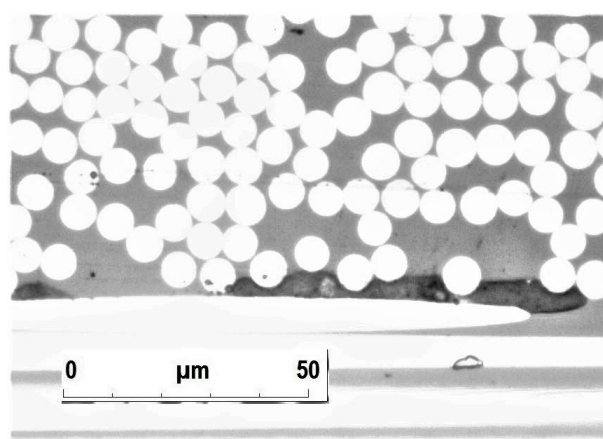


Figura 7-5 . Delaminación en la 15B, ensayo al 50%.

Además de esta diferenciación, en el análisis llevado a cabo en la presente sección se distinguirá entre delaminaciones que rompen la lámina a  $0^\circ$  y delaminaciones que recorren la interfaz de separación sin rebasarla. Esta clasificación se hace con el objetivo de obtener una idea más clara de como se produce el desarrollo y la evolución de este tipo de daño en los paneles considerados y el alcance del daño. En las Figuras 7-6 a 7-11 se muestran una serie de ejemplos de delaminaciones que se desarrollan rompiendo las láminas a  $0^\circ$ .

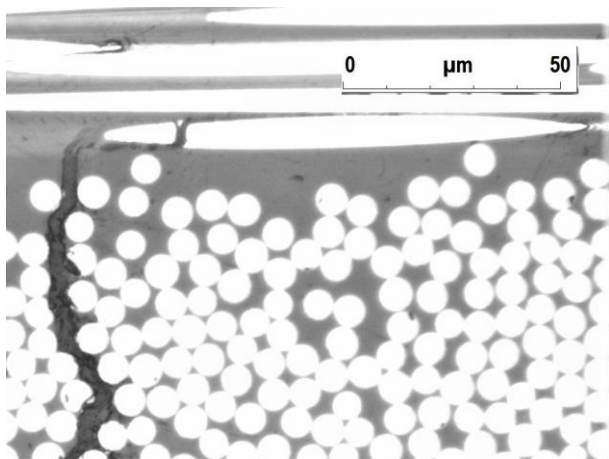


Figura 7-6. Delaminación en la 7B, ensayo al 80%.

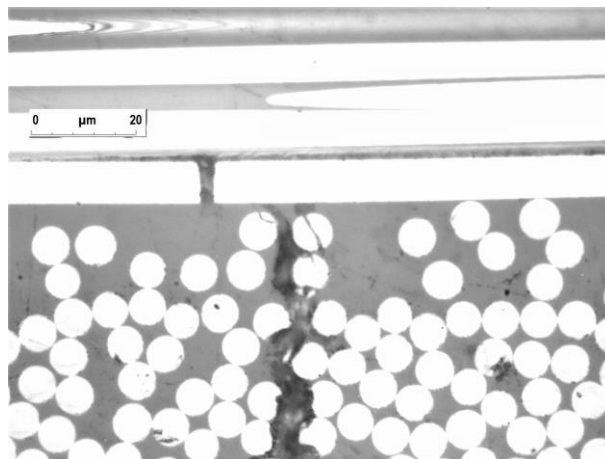


Figura 7-7. Delaminación en la 7B, ensayo al 80%.

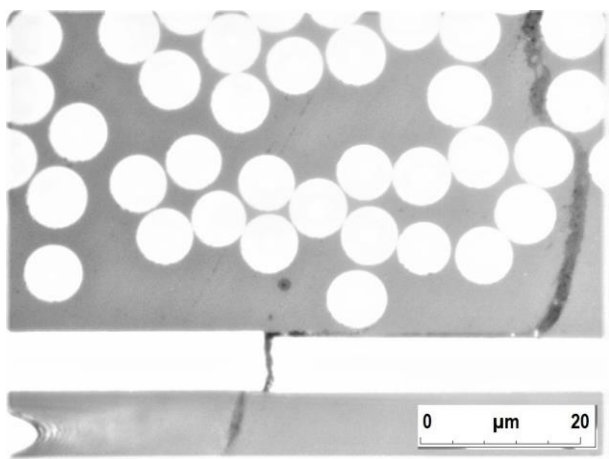


Figura 7-8. Delaminación en la 23B, ensayo al 70%.

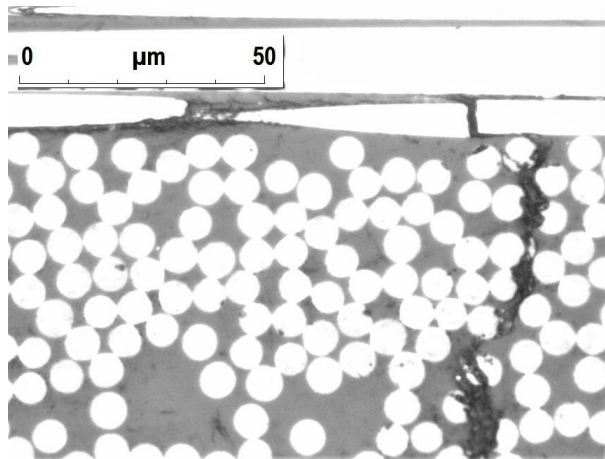


Figura 7-9. Delaminación en la 9B, ensayo al 80%.

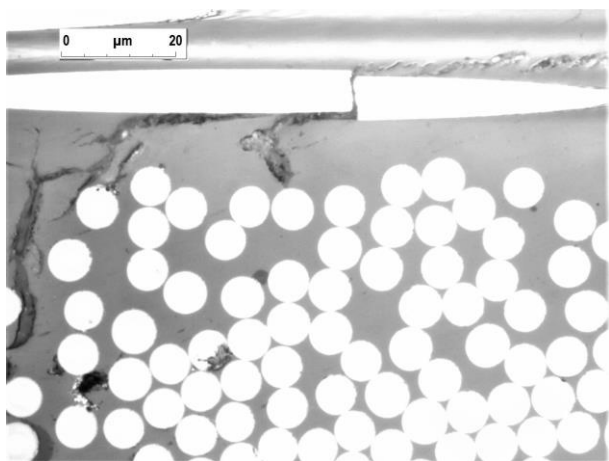


Figura 7-10. Delaminación en la 25B, ensayo al 90%.

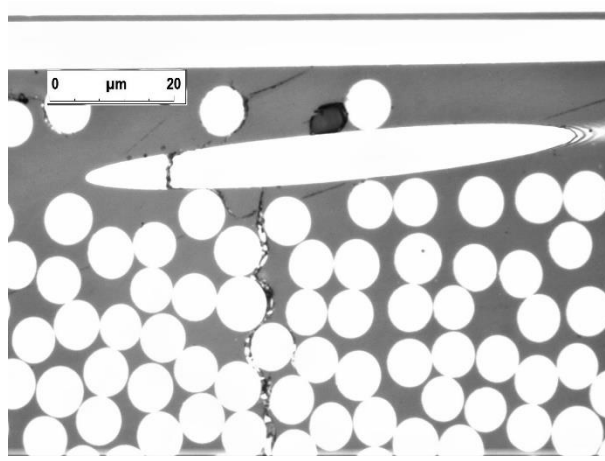


Figura 7-11. Delaminación en la 25A, ensayo al 90%.



En las Figuras 7-12 a 7-17 se aprecian grietas que bordean la interfaz sin romper la lámina de 0°.

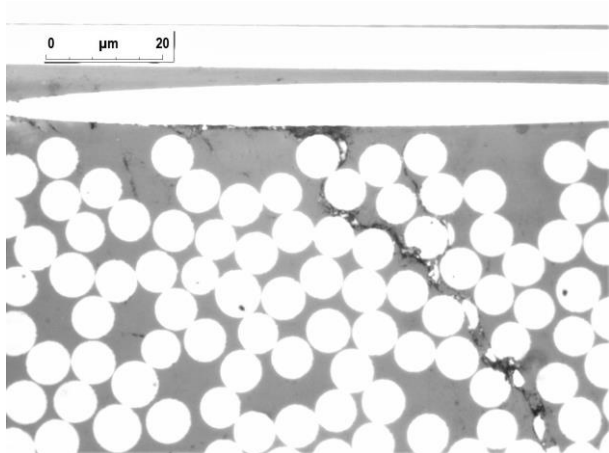


Figura 7-12. Delaminación en la 7B, ensayo al 80%.

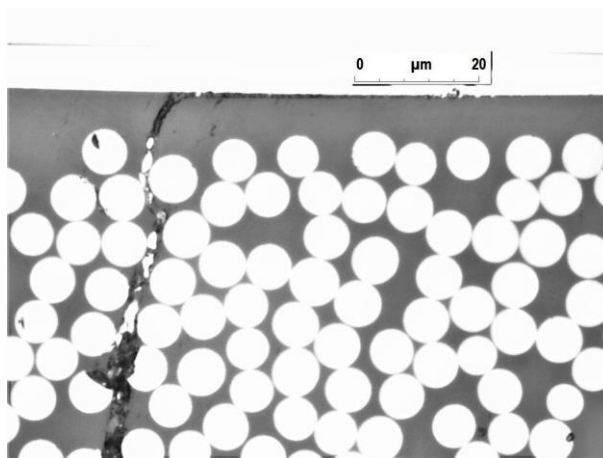


Figura 7-13. Delaminación en la 14B, ensayo al 50%.

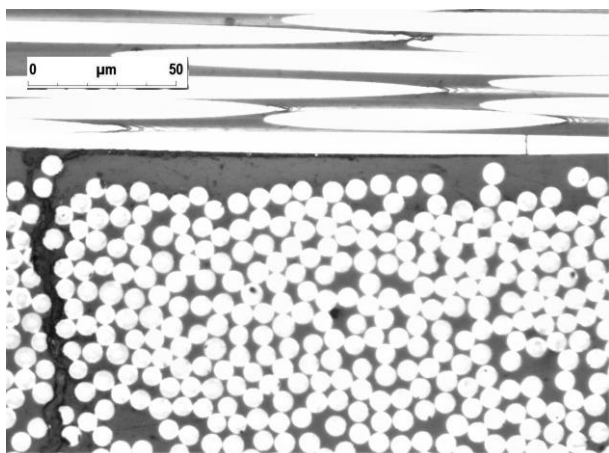


Figura 7-14. Delaminación en la 7B, ensayo al 80%.

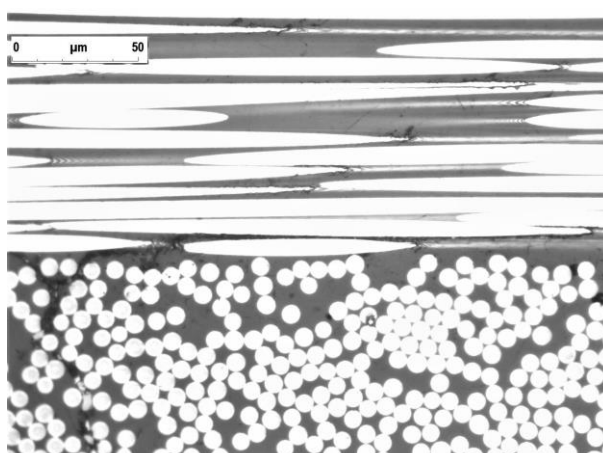


Figura 7-15. Delaminación en la 7B, ensayo al 80%.

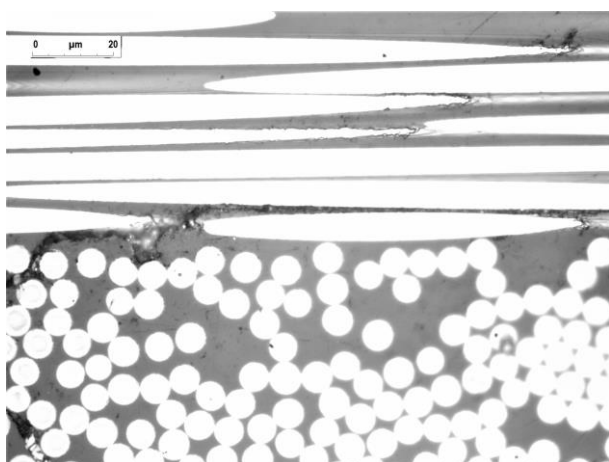


Figura 7-16. Delaminación en la 7B, ensayo al 80%.

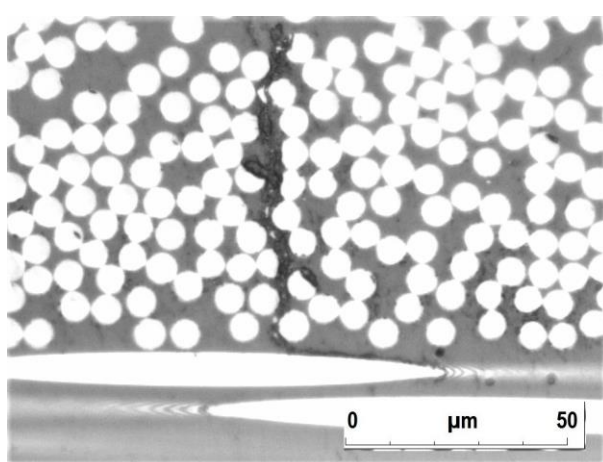


Figura 7-17. Delaminación en la 8A, ensayo al 80%.

Las Figuras 7-12 a 7-17 muestran delaminaciones en distinto estado de desarrollo, desde una delaminación de pequeño tamaño (Figura 7-12) a una delaminación que se extienden por un tramo considerable de la sección (Figura 7-15 y 7-16). Aunque el tamaño alcanzado por la delaminación a lo largo de la interfaz de separación no se ha cuantificado numéricamente en el presente trabajo, sí que se han realizado una serie de observaciones al respecto. En primer lugar, se ha observado que en el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , las delaminaciones no llegan, ni siquiera para altos niveles de carga, a alcanzar un gran recorrido, tal y como se observa en la ilustración 7-17. Sin embargo, en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , a partir del 60% de la carga de rotura ya se pueden observar delaminaciones de gran tamaño. A partir de este nivel de carga, para cada muestra, se encuentran delaminaciones en distintas etapas de desarrollo, desde delaminaciones pequeñas hasta delaminaciones que alcanzan una gran extensión. Esto se puede ver en las Figuras 7-14, 7-15 y 7-16, correspondientes a la muestra 7B, ensayada al 80% de la tensión media de rotura del panel B.

En todas las micrografías de delaminaciones que se producen al final de una grieta expuestas hasta el momento se han mostrado grietas que se desvían siguiendo solo un camino bordeando la interfaz y convirtiéndose en una delaminación, pero esto no siempre se produce así. En el recuento de delaminaciones al final de una grieta se han observado dos tendencias: la ya comentada y grietas que cerca de la lámina a  $0^\circ$  se bifurcan siguiendo dos caminos y se prolongan formando delaminaciones tanto a la derecha como a la izquierda de la grieta. En las Figuras 7-18 a 7-21 se recogen ejemplos de esta segunda tendencia.

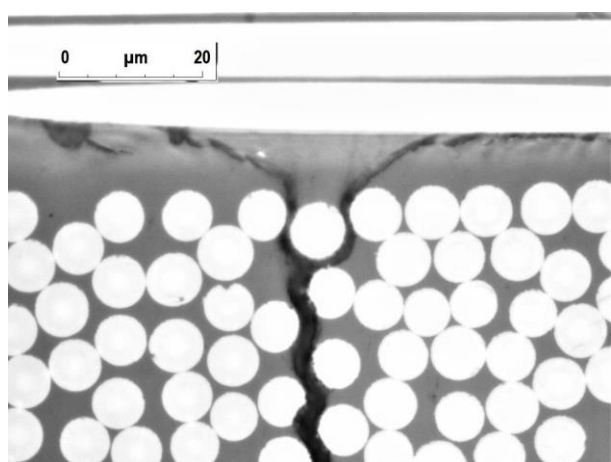


Figura 7-18. Delaminación en la 22B.

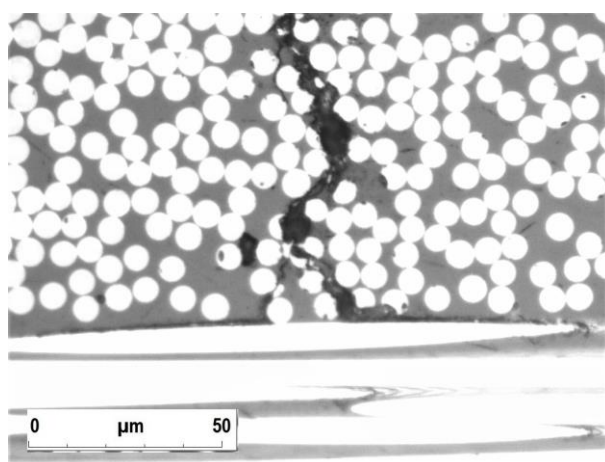


Figura 7-19. Delaminación en la 7B.

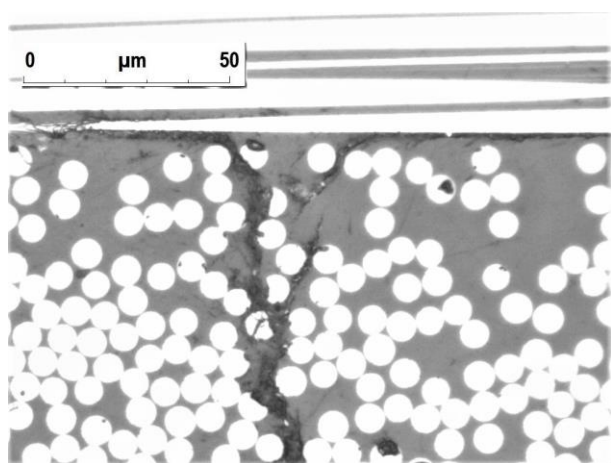


Figura 7-20. Delaminación en la 9B.

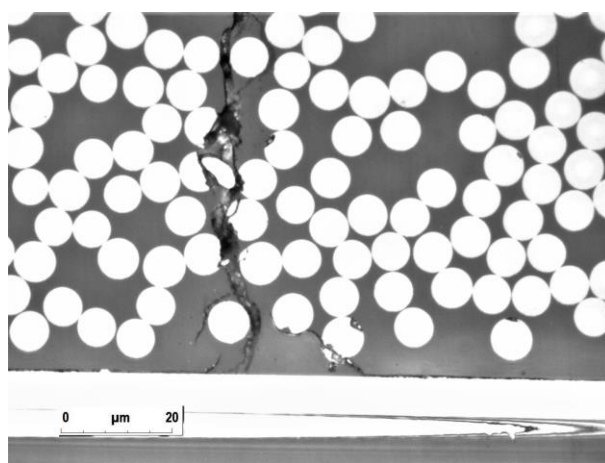


Figura 7-21. Delaminación en la 25B.

Una vez se ha expuesto claramente el tipo de defecto bajo estudio, se pasa a realizar un análisis estadístico del número de delaminaciones que aparece en cada panel por unidad de longitud, diferenciando entre delaminaciones lejos de una grieta, delaminaciones al final de una grieta que rompen las láminas a  $0^\circ$  y delaminaciones al final de una grieta que no rompen la lámina a  $0^\circ$ . Una vez completado este se realizará una comparación entre los resultados obtenidos para cada laminado y sus posibles efectos en la resistencia de cada uno.

Un aspecto importante a tener en cuenta es el hecho de que cuando una grieta se bifurca cerca de la lámina a  $0^\circ$  y se prolonga formando delaminaciones en ambos sentidos de la grieta, se han contabilizado dos delaminaciones.

En un primer lugar, y tal y como se ha procedido en el análisis de defectos a otras escalas, se ha contabilizado la densidad de delaminaciones (delaminación por centímetro) de cada tipo en cada uno de los paneles, obteniéndose los resultados que aparecen recogidos en la tabla 7-1 para el panel A, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_S$ , y en la tabla 7-2 para el panel B, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_S$ .

Porcentaje de carga	Muestra del Panel A $[0_2, 90_2]_S$	Delaminaciones al final de una grieta sin romper la lámina de $0^\circ$	Delaminaciones al final de una grieta que rompe la lámina de $0^\circ$	Delaminaciones lejos de una grieta	Delaminaciones totales
<b>90%</b>	25A	0.096	0	0	0.096
	<b>Media</b>	<b>0.096</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.096</b>
<b>80%</b>	6A	0	0	0	0
	7A	0	0	0	0
	8A	0.077	0	0.153	0.23
	9A	0.294	0.073	0.073	0.44
	10A	0.079	0	0.079	0.158
	<b>Media</b>	<b>0.09</b>	<b>0.0146</b>	<b>0.061</b>	<b>0.1656</b>
<b>70%</b>	20A	0	0	0	0
	24A	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>60%</b>	21A	0	0	0	0
	22A	0	0	0.106	0.106
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.053</b>	<b>0.053</b>
<b>50%</b>	11A	0	0	0.183	0.183
	12A	0	0	0	0
	13A	0	0	0.154	0.154
	14A	0	0	0.153	0.153
	15A	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.098</b>	<b>0.098</b>
<b>40%</b>	18A	0	0	0	0
	19A	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>30%</b>	16A	0	0	0	0
	17A	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla 7-1. Densidad delaminaciones (delaminación/cm) para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .



Porcentaje de carga	Muestra del Panel B [0 <sub>2</sub> , 90 <sub>4</sub> ] <sub>S</sub>	Delaminaciones al final de una grieta sin romper la lámina de 0°	Delaminaciones al final de una grieta que rompe la lámina de 0°	Delaminaciones lejos de una grieta	Delaminaciones totales
90%	25B	3.56	0.42	0.105	4.085
	<b>Media</b>	<b>3.56</b>	<b>0.42</b>	<b>0.105</b>	<b>4.085</b>
80%	6B	2.77	0.55	0	3.32
	7B	4.38	1.19	0.46	6.03
	8B	2.79	0.68	0.15	3.62
	9B	3.04	0.99	0.076	4.11
	10B	3.13	0.915	0.076	4.12
	<b>Media</b>	<b>3.22</b>	<b>0.865</b>	<b>0.152</b>	<b>4.24</b>
70%	23B	1.92	0.45	0	2.37
	24B	1.24	0.23	0.113	1.583
	<b>Media</b>	<b>1.58</b>	<b>0.34</b>	<b>0.0565</b>	<b>1.976</b>
60%	21B	0.88	0.11	0	0.99
	22B	0.49	0	0	0.49
	<b>Media</b>	<b>0.685</b>	<b>0.055</b>	<b>0</b>	<b>0.74</b>
50%	11B	-	-	-	-
	12B	0	0	0	0
	13B	0	0	0.084	0.084
	14B	0.072	0	0	0.072
	15B	0.074	0	0	0.074
	<b>Media</b>	<b>0.0365</b>	<b>0</b>	<b>0.021</b>	<b>0.0575</b>
40%	18B	0	0	0	0
	19B	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
30%	16B	0	0	0	0
	17B	0	0	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla 7-2. Densidad delaminaciones (delaminación/cm) para el panel B, [0<sub>2</sub>, 90<sub>4</sub>]<sub>S</sub>.

En estas tablas se puede ver como las delaminaciones al final de una grieta, tal y como cabía esperar, crecen con la carga aplicada, mientras que las delaminaciones lejos de una grieta no siguen ningún patrón determinado en el panel A pero si crecen con la tensión soportada por las probetas del B. Si se comparan los resultados obtenidos para este tipo de delaminación en muestras de un mismo panel ensayadas a un mismo nivel de carga se observa una alta dispersión de resultados. Estos hechos, es decir, el que no se cumpla en todos los casos el crecimiento de este tipo de fallo con la tensión y que no exista una densidad similar en muestras del mismo panel ensayadas a la misma tensión, es un indicador de que este tipo de delaminaciones más que con el nivel de carga aplicado puedan estar relacionados con defectos en el proceso de fabricación que se han visto aumentados bajo la aplicación de carga.

Por otro lado, comentar que la probeta 11B no se ha tenido en cuenta en los cálculos en adelante pues fue recubierta con un baño de oro que permitía la visualización en otro microscopio, pero que hizo imposible seguir con el análisis con el equipo empleado en el laboratorio.

Volviendo al estudio de la densidad de las delaminaciones, con el objetivo de visualizar más claramente lo recogido en las tablas 7-1 y 7-2 se hacen una serie de representaciones gráficas. En primer lugar, se muestra la densidad de delaminaciones (delaminación/cm) en cada una de las muestras bajo análisis. En el Gráfico 7-1 aparecen los datos recabados para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y el gráfico 7-2 para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

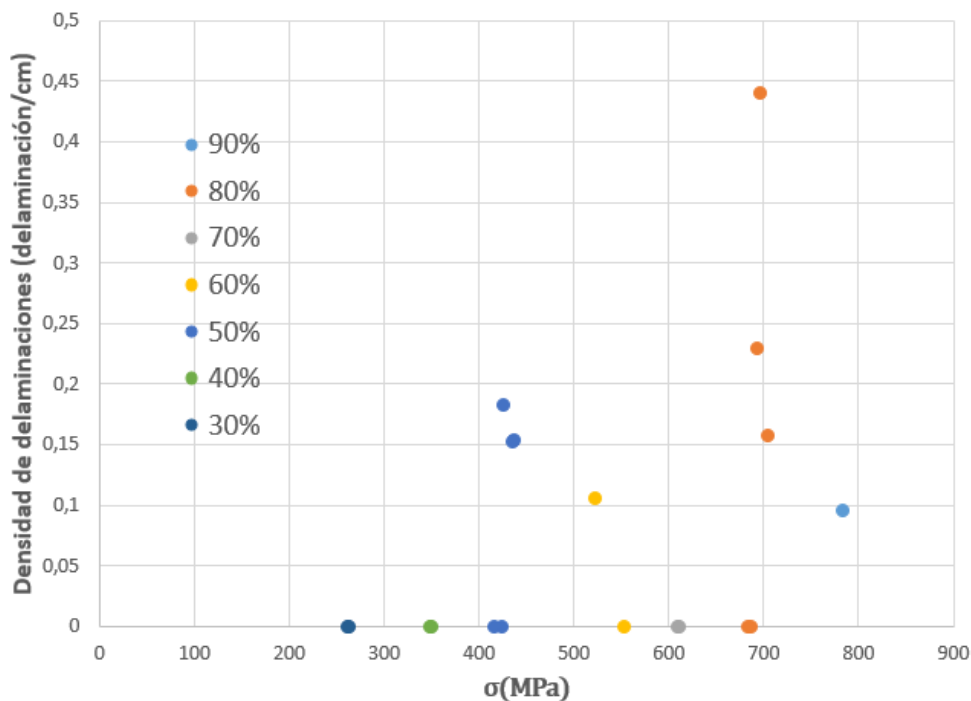


Gráfico 7-1. Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

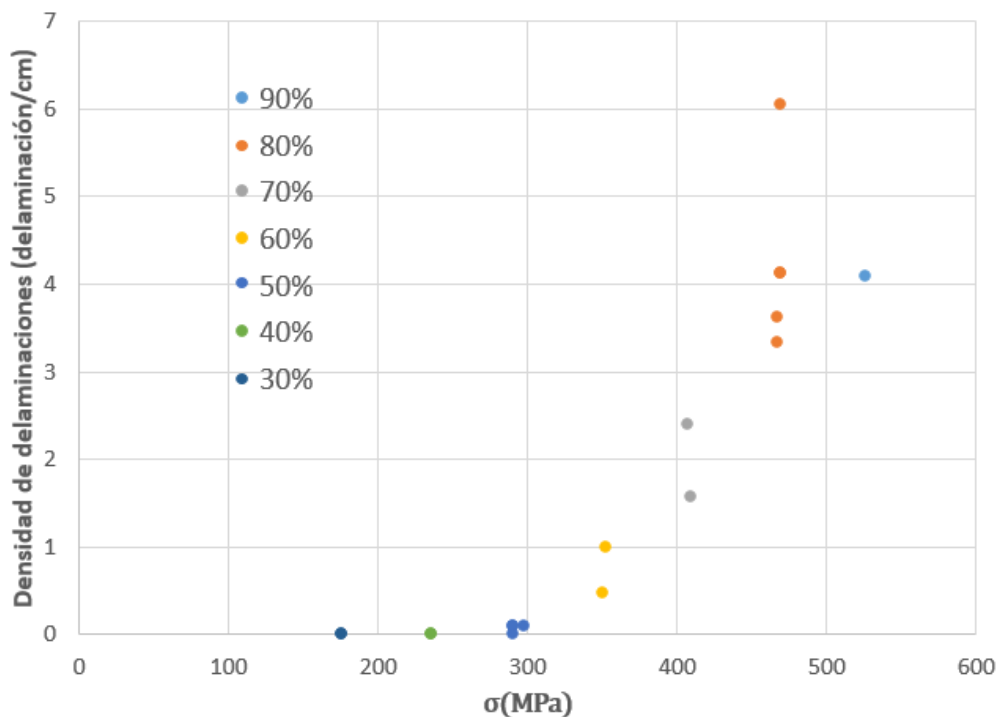


Gráfico 7-2 . Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

A simple vista, en el recuento de delaminaciones totales del panel A,  $[0_2, 90_2]_S$  se observa una gran dispersión de los resultados para un mismo nivel de carga, relacionado con el hecho de el número de delaminaciones totales máximo alcanzado por las muestras del panel A es muy pequeño y, por tanto, la escala del gráfico puede hacer parecer que existe una gran dispersión cuando a pesar de que esta se da, el valor numérico es bastante cercano. Además no se aprecia una tendencia claramente creciente. Si se compara con los resultados obtenidos para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , se observa que en este la dispersión para un mismo nivel de carga es mucho menor y que existe una clara tendencia creciente del valor medio con el nivel de carga. Las diferencias observadas en ambos paneles pueden tener su origen en el tipo de delaminación predominante, ya que, tal y como se ha comentado, el valor de la densidad de delaminaciones lejos de una grieta no sigue un patrón concreto de crecimiento con la tensión aplicada y es el tipo predominante en las muestras del panel A.

Además, si se compraran muestras de un mismo panel sometidas a un mismo nivel de tensión se aprecia una gran dispersión en el valor de la densidad de este daño.

Para realizar una comparación más clara entre los resultados obtenidos en ambos paneles, en el Gráfico 7-3 se representan los valores medios de densidad total de delaminaciones frente a porcentaje de la tensión media de rotura del propio panel al que han sido sometidas las muestras.

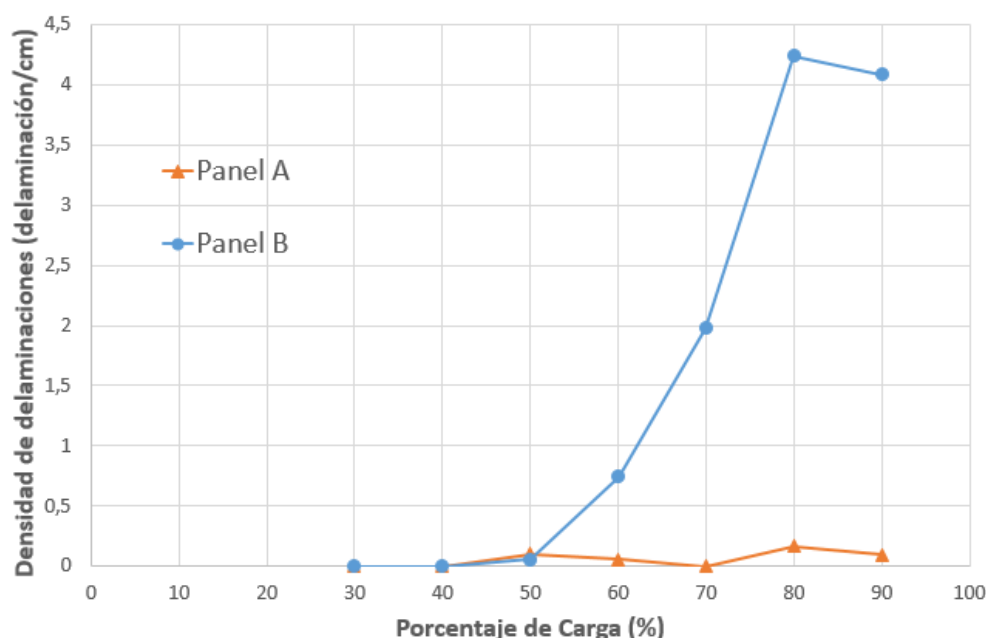


Gráfico 7-3. Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y B,  $[0_2, 90_4]_S$ , frente a porcentaje de carga.

Se aprecia que la primera delaminación aparece para el mismo porcentaje de carga en ambos paneles, es decir, para el 50% de su tensión media de rotura. Tal y como se intuía en la representación de la densidad de delaminaciones en cada panel, en el panel A no se aprecia una tendencia creciente con el nivel de carga si no que esta va variando. El hecho de que para el panel A esta curva no sea creciente en todo momento se debe a la existencia predominante a algunos niveles de carga de delaminaciones lejos de la grieta, que tal y como se ha comentado, no siguen un patrón de crecimiento con la tensión determinado. Este hecho también es el responsable de la variación observada para muestras ensayadas a un mismo nivel de carga.

Realizando el mismo análisis para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$  sí que se observa una tendencia creciente del número de delaminaciones con el nivel de carga. Se observa un cambio del crecimiento de la curva a decreciente al aumentar el porcentaje de carga del 80% al 90%, pero no se puede perder de vista que el resultado obtenido para el 80% es la media de 4 muestras mientras que para el panel B solo se ha observado una muestra y, tal y como se vió en la determinación de la tensión de rotura, no todas las probetas aguantan el mismo nivel de

tensión y por tanto no todas aguantan el mismo daño. Para obtener una representación más realista habría que obtener un mayor número de muestras al 90% y comparar resultados. Sin embargo, la muestra ensayada da muestras de la veracidad de los resultados obtenidos al no salirse del rango de valores esperado.

El hecho de que en el panel B la densidad de delaminaciones crezca con el nivel de carga casa con lo visto numéricamente en la tabla 7-2, donde se ve que todos los tipos de delaminación tenidos en cuenta tienen una tendencia creciente en el panel B. Sin embargo, según lo observado en el panel A la delaminación lejos de una grieta no está estrechamente relacionada con la resistencia ni sigue un patrón fijo. En la tabla 7-2 se aprecia que en el panel B, para las muestras sometidas a la misma tensión hay una gran variabilidad en la densidad de delaminaciones lejos de una grieta. Luego en el panel B, la dispersión entre las muestras se atenúa y la tendencia se vuelve creciente debido a la existencia de un mayor número de delaminaciones al final de la grieta, donde si que se puede establecer un patrón de crecimiento, que de delaminaciones lejos de una grieta.

Por otro lado, se observa que en el panel B la densidad de delaminaciones máxima alcanzada es mucho mayor en el panel B que en el panel A, llegando a estar un 97% por encima. Para poder relacionar este fenómeno con la resistencia de cada laminado, en el Gráfico 7-4 se ha representado la densidad de delaminaciones frente a la tensión media soportada para un determinado porcentaje de la tensión de rotura, ya que no se puede perder de vista el hecho de que, aunque el porcentaje al que aparece la primera delaminación es el mismo en ambos casos, es decir, el 50%, este porcentaje representa un valor de tensión de 292.58 MPa para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , frente a los 435.43 MPa que representa en el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

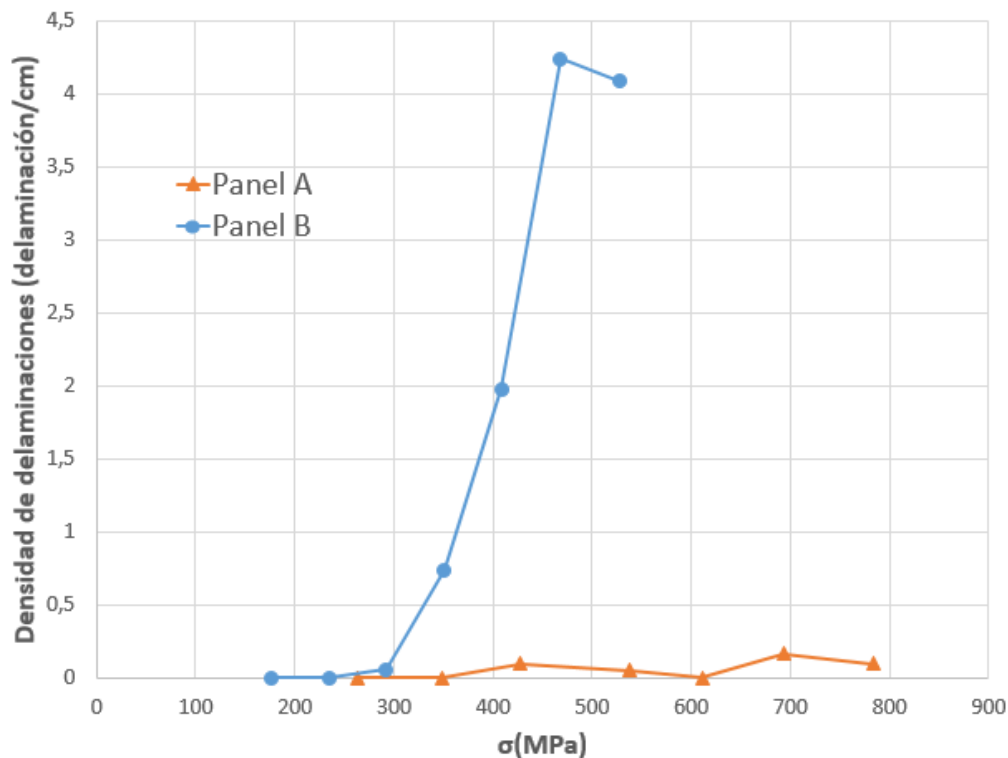


Gráfico 7-4. Densidad delaminaciones totales (delaminación/cm) para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y B,  $[0_2, 90_4]_S$ , frente a tensión.

Comparando para un mismo nivel de tensión se aprecia que en el panel grueso, es decir, el panel B, la primera delaminación aparece a un más bajo nivel de carga, y que para un mismo nivel de tensión, hay una mayor densidad de este tipo de daño en el panel B. Con el objetivo de relacionar esta mayor densidad en las delaminaciones con el hecho de que en el panel A alcance una mayor densidad de grietas sin romper, se rescata la gráfica correspondiente a la densidad de grietas transversales frente a la tensión aplicada expuesta en la sección 6.1.3.

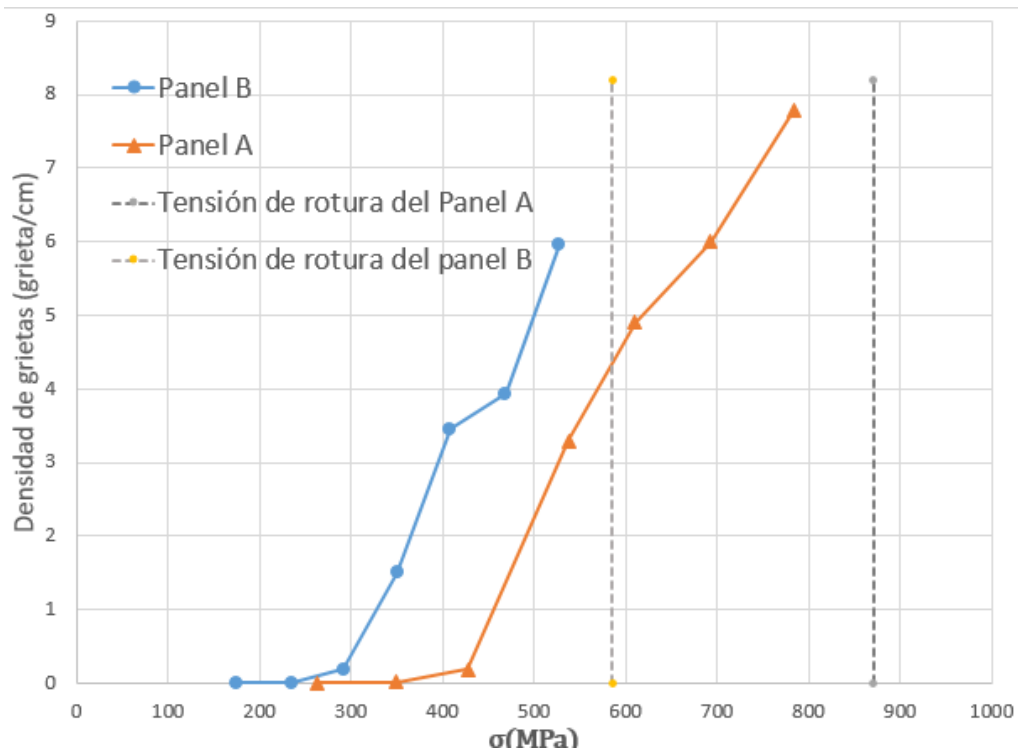


Gráfico 7-5. Densidad grietas transversales (grieta/cm) para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y B,  $[0_2, 90_4]_S$ , frente a tensión.

Comparando ambas gráficas se observa que ambos tipos de daños, es decir, tanto las grietas transversales como la delaminación aparecen para un nivel de carga inferior en el panel B. Esto concuerda con el hecho de que las delaminaciones, como se ha introducido en el presente capítulo, están asociadas a grietas transversales que alcanzan la interfaz de separación entre las láminas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y se propagan a través de ellas, por lo que es intuitivo pensar que a mayor número de grietas mayor número de delaminaciones. Sin embargo, se aprecia que la densidad de grietas en el panel A crece con aproximadamente la misma pendiente que el panel B pero llega a un valor mayor debido a la mayor resistencia de este panel. Pero en cuanto a densidad de delaminaciones, y a pesar del mayor número de grietas alcanzado en el panel A, estas permanecen en valores muy bajos mientras que en el panel B crecen con la carga aplicada de forma acusada. Además, a la hora de clasificar las delaminaciones en los tres tipos comentados se observará que el número de delaminaciones que aparecen al final de una grieta en el panel A aparece para muy altos niveles de carga y es casi insignificante.

Este hecho, es decir, que el panel B se delamine en una proporción mucho mayor que el panel A podría ser una de las causas de que el laminado grueso, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_4]_S$  rompa antes de alcanzar el número de grietas que alcanza el laminado delgado, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_S$  ya que este está más dañado internamente, contando con un mayor número de delaminaciones, provocando una rotura

más temprana. El hecho de que el laminado B se delamine más que el laminado A también se puede relacionar con la forma de rotura de las probetas. En la sección 4.3.1.3 se muestran una serie de imágenes donde se recogen la zona de rotura de cada una de las muestras y se ve, claramente, que las probetas del laminado B han roto de una forma más catastrófica, separándose en todos los casos las láminas a  $0^\circ$  de las de  $90^\circ$  en algún tramo, mientras que en el panel A se aprecian probetas que las que únicamente se han roto las láminas a  $90^\circ$  permaneciendo las de  $0^\circ$  unidas entre sí y a las de  $90^\circ$  en toda la probeta excepto donde se han destruido las láminas a  $90^\circ$ .

Una vez aclarado este punto, se representa que proporción de las delaminaciones tenidas en cuenta en el recuento forma parte del total para cada nivel de carga en cada panel. En el gráfico 7-6 se puede observar la contribución de cada tipo de delaminación considerada a las delaminaciones totales para el panel A.

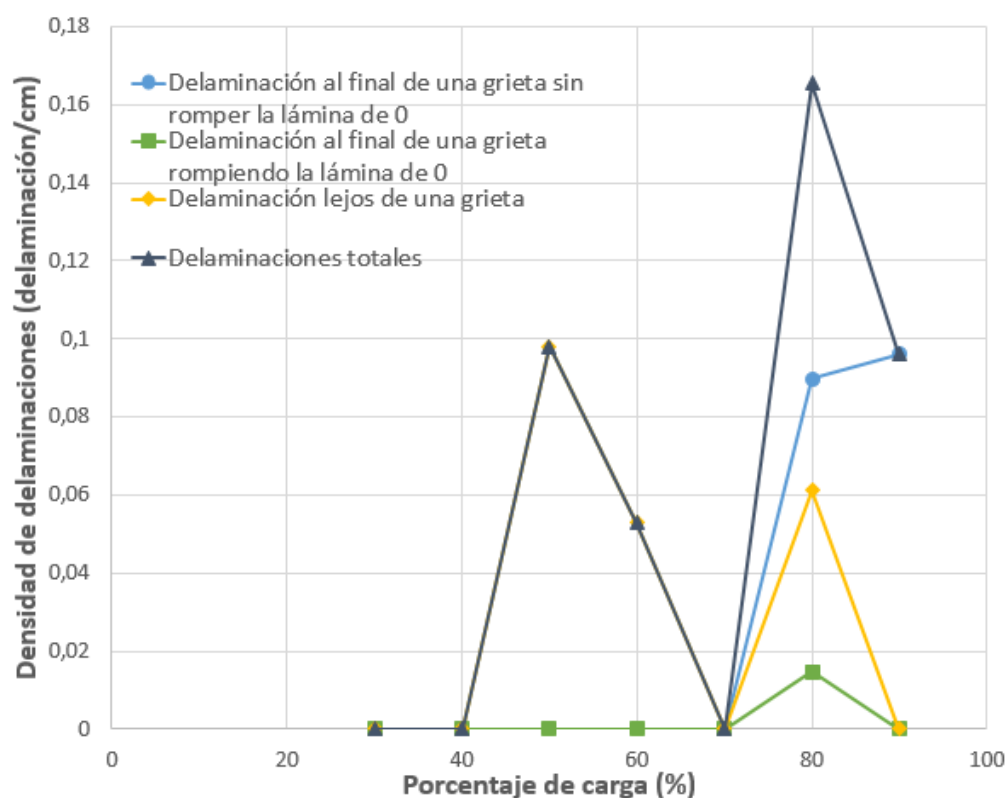


Gráfico 7-6. Clasificación de la densidad de delaminaciones de cada tipo y contribución a la densidad de delaminaciones total para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ .

Tal y como se ha comentado, la primera delaminación aparece para un 50% de carga, pero ahora se puede identificar que esta se corresponde con una delaminación lejos de una grieta. Si se analiza este tipo de delaminación en solitario se aprecia su crecimiento errático, luego más que en el nivel de carga, este tipo de delaminación podría tener su origen en defectos introducidos en la fabricación del material.

Pasando al estudio de las delaminaciones al final de una grieta se ve que estas no aparecen hasta el un nivel de tensión bastante alto, del 80% de la tensión de rotura, es decir, hasta un valor de la tensión de 696.68 MPa, superior a la tensión de rotura del panel B, de 585.15 MPa y aparecen en muy poca cantidad. De hecho, el recuento total es de 1.4 delaminaciones en las muestras ensayadas al 80% (valor medio de las delaminaciones contadas en todas las probetas) y 1 en la muestra ensayadas al 90%. Es decir, en el

panel delgado es un defecto que aparece de forma muy aislado. Este tipo de defecto tiene una contribución bastante significativa en la rotura del material, lo que su tardía y escasa aparición en el panel A aumenta su resistencia.

En el Gráfico 7-7 se realiza la misma representación para el panel B.

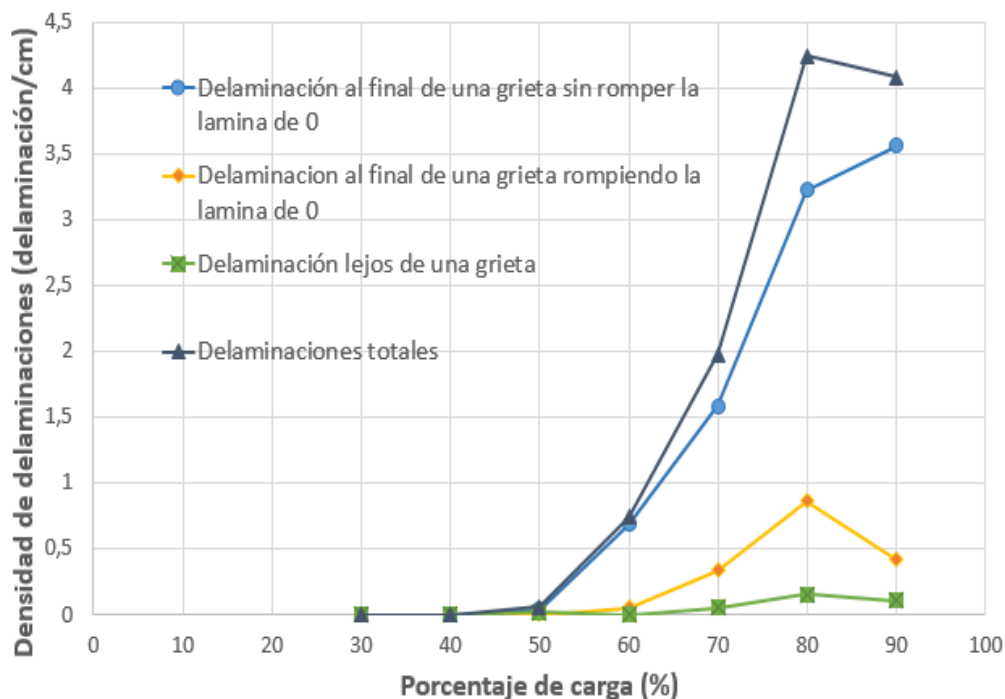


Gráfico 7-7. Clasificación de la densidad de delaminaciones de cada tipo y contribución a la densidad de delaminaciones total para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Analizando el crecimiento de la densidad de delaminaciones con el porcentaje de carga de izquierda a derecha se realizan las siguientes observaciones:

- La primera delaminación que se aprecia, al 50%, se corresponden con una delaminación al final de una grieta que avanza sin romper la lámina a  $0^\circ$ . A partir de su aparición este tipo de delaminaciones crece con pendiente acusada alcanzando un valor considerable y manteniéndose siempre por encima del resto.
- El segundo tipo de delaminación que aparece, al 60% del porcentaje de tensión de rotura, es la delaminación lejos de una grieta. Se aprecia que al igual que en el panel A, la densidad de delaminaciones lejos de una grieta permanece muy baja aunque se vea una tendencia de crecimiento de esta más ordenada.
- El último tipo de delaminación en aparecer en las muestras exploradas, tal y como cabía esperar, pues a más carga mayor alcance del daño, es la delaminación que provoca la rotura de la lámina de  $0^\circ$  que aparece para un 70 % de la carga y tiene una tendencia creciente. La disminución de la densidad al 90%, está relacionada, tal y como se ha comentado, con el hecho de que solo se ha

ensayado una muestra a este porcentaje de carga por lo que si existe un valor disperso no se puede contrastar realizando la media con otra muestra ensayada al mismo nivel de carga como si que se puede hacer al 80% , obteniendo resultados más fiables.

De estas representaciones se vuelve a deducir lo ya comentado. Mientras que la delaminación es un efecto puntual en el panel delgado (A,  $[0_2, 90_2]_S$ ) es un defecto bastante importante en el panel (B,  $[0_2, 90_4]_S$ ), lo que, tal y como hemos hecho, se puede relacionar con la resistencia del material. Para recalcar este hecho, en el gráfico 7-8 se ha hecho una representación del porcentaje de terminaciones de grieta que acaban en delaminación en las muestras de cada panel, entendiendo como terminación de grieta la parte de esta que llega cerca de la lámina de  $0^\circ$ .

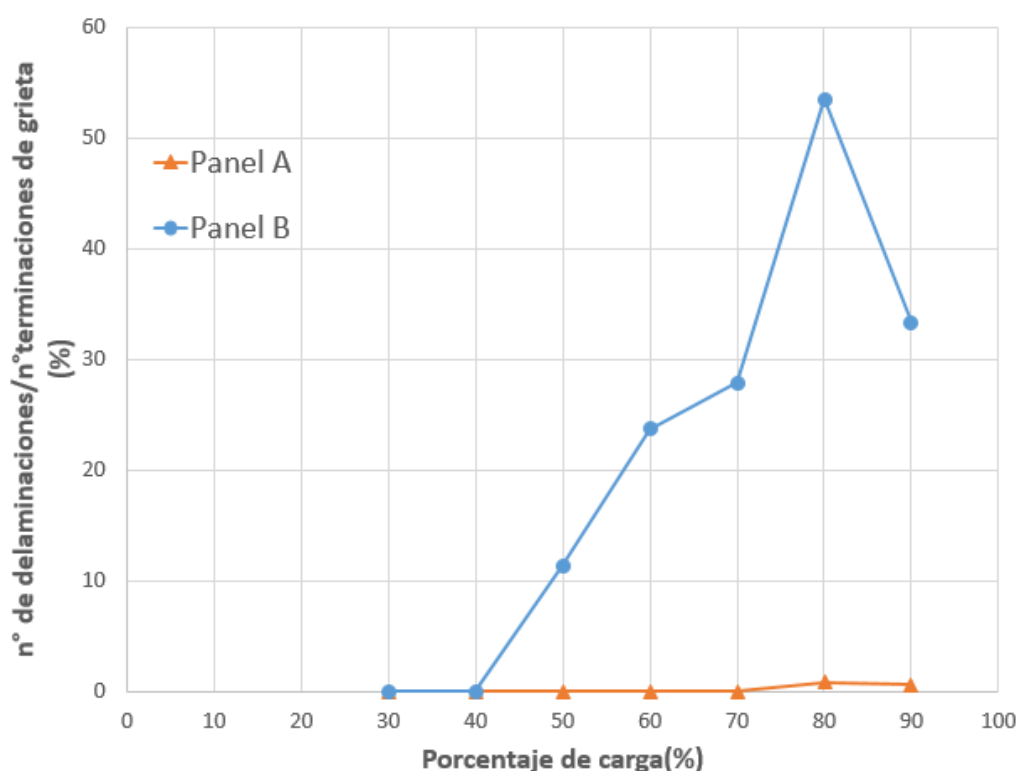


Gráfico 7-8. Porcentaje de terminaciones de grieta que terminan en delaminación para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , y B,  $[0_2, 90_4]_S$ , frente al porcentaje de carga aplicado.

Se ve que excepto el cambio de tendencia que se experimenta al 90% debido al efecto ya explicado, conforme aumenta el nivel de carga aumenta el porcentaje de grietas que terminan delaminación. Además, se recalca el hecho de que este fenómeno es mucho más acusado en el panel B, donde se llegan a superar un 50% de terminaciones de grieta que terminan en delaminación, que en el panel A, donde no alcanza el 5%.



## 7.2 Tipos de daño en la sección de las láminas a 90°

Una vez hecho el análisis del daño en la interfaz entre las láminas a 0° y a 90° se ha pasado al estudio de la sección completa de las láminas a 90°. Tal y como se ha procedido hasta ahora, se realizan comparaciones del daño sufrido por muestras pertenecientes a distintos laminados que han sido sometidas al mismo porcentaje de carga respecto a la tensión de rotura del panel al que pertenecen. La presente sección, más que en un análisis estadístico de densidad del daño frente a carga aplicada, se centra ahora en la identificación, clasificación y distinción de los mecanismos de daño que aparecen para cada panel y nivel de carga. A las fases I y II de daño introducidas en el capítulo 2 se las denominará ahora despegues, y a la fase III microgrieta. A pesar de que este tipo de daño es una macrogrieta se ha empleado esta nomenclatura para distinguir la grieta transversal de pequeñas grietas que transcurren a través de un pequeño número de fibras.

### 7.2.1 Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura

Antes de pasar al estudio realizado sobre el daño sufrido por las muestras cuando se ha aplicado sobre ellas una carga del 90% de la tensión media de rotura se hace hincapié en el hecho de que a este nivel de carga solo se ha ensayado una muestra de cada laminado, lo que hace que el área recorrida sea al menos dos veces menor que en el resto de porcentajes de carga. Además, las micrografías expuestas en la primera sección han sido realizadas sobre las muestras cuando sobre estas se había aplicado una única secuencia de lijado y pulido. Este hecho es importante, pues, como se verá en la sección 7.3 los resultados pueden presentar variaciones con el proceso del pulido. Una vez expuesto esto se pasa a analizar la sección de las láminas a 90°.

La primera diferencia observada en el análisis de las muestras ensayadas al 90% de la tensión de rotura media del laminado correspondiente está relacionada con el defecto analizado en la sección anterior: la delaminación. En el análisis detallado realizado de la interfaz entre las láminas a 0° y a 90° se ha observado una tendencia dominante distinta en la forma en que la grieta llega a la lámina a 0°, independientemente de que se produzca la delaminación o no.

En el panel A, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_S$ , las grietas terminan, por lo general, de forma continua y con una tendencia recta. No tienden a bifurcarse al acercarse a la lámina de 0° en más de un camino, aunque como se ve más adelante, esto sí se puede observar en la parte central de la macrogrieta. La bifurcación más grande de una grieta encontrada en esta muestra está representada en la Figura 7-27. Aparte de terminar de forma continua, en las Figuras 7-22 a 7-27 se observa también que en las cercanías de la lámina a 0° no tienden a desviarse con respecto a la dirección perpendicular a la carga, sino que continúan un camino aproximadamente recto entre las fibras.

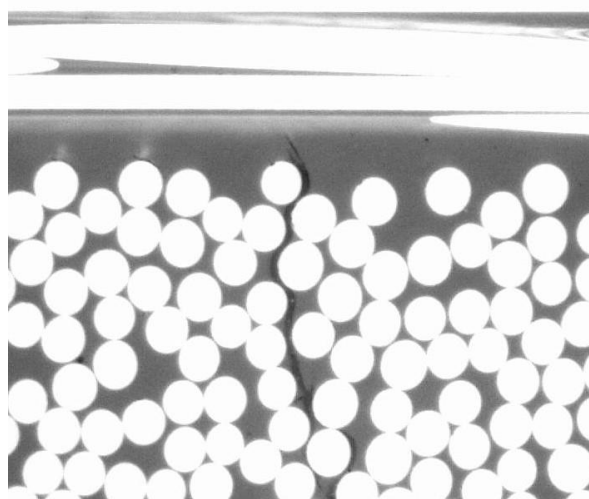


Figura 7-22. Terminación de grieta en la 25A.

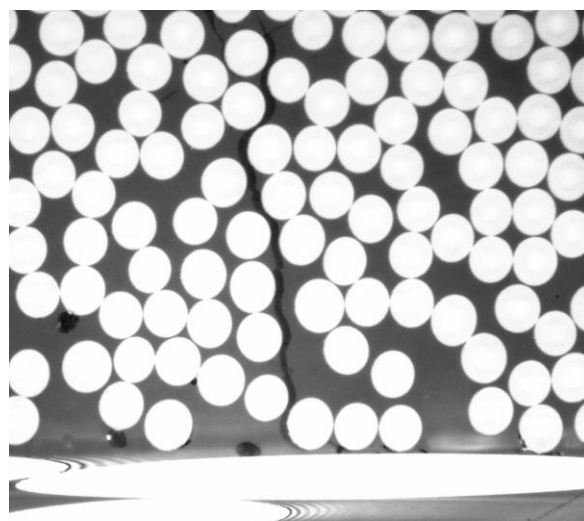


Figura 7-23. Terminación de grieta en la 25A.

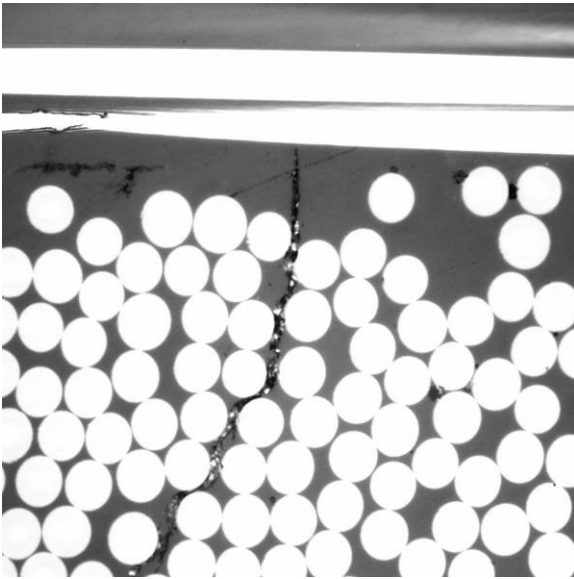


Figura 7-24. Terminación de grieta en la 25A.

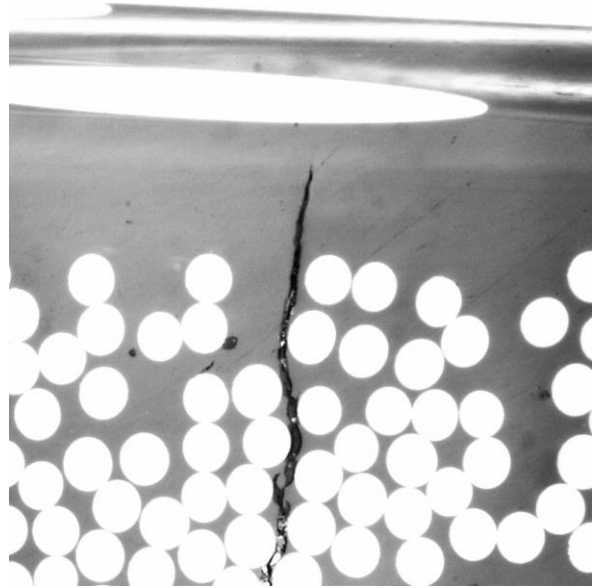


Figura 7-25. Terminación de grieta en la 25A.

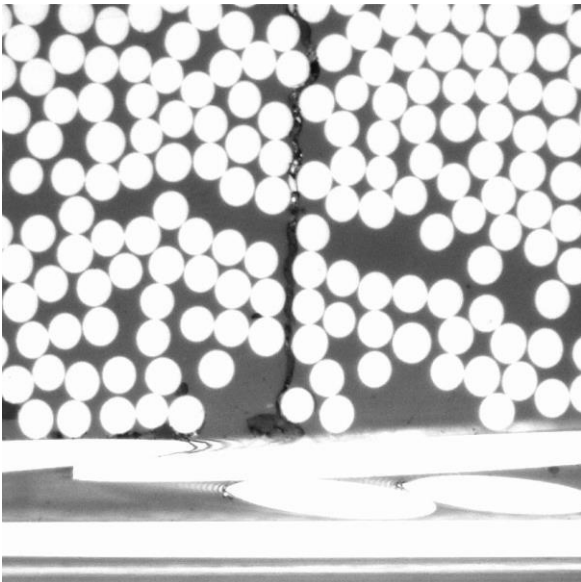


Figura 7-26. Terminación de grieta en la 25A.

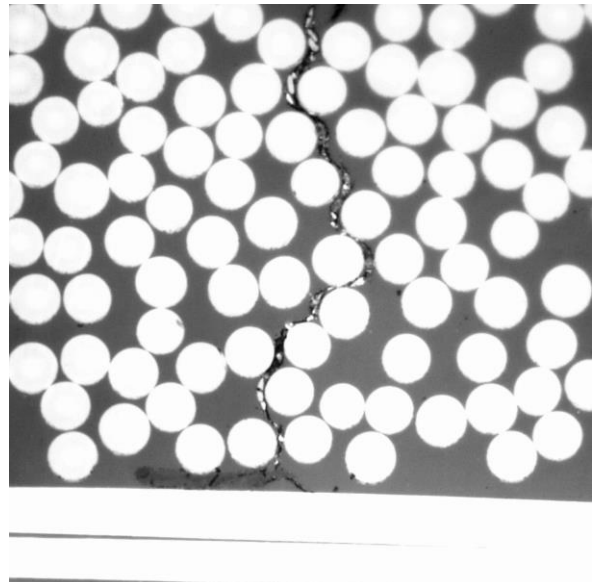


Figura 7-27. Terminación de grieta en la 25A.

En el panel B, con secuencia de apilado,  $[0_2, 90_4]_S$ , sin embargo, se aprecia más heterogeneidad en la forma de las grietas cerca de las láminas a  $0^\circ$ . Por un lado, y tal como se muestra en las Figuras 7-28 a 7-31 existen grietas que llegan a la interfaz de separación entre las láminas a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  de forma recta y continua, de igual forma que la tendencia general observada en el panel A. Por otro lado, existen grietas que llegan de forma continua pero desviada. Esto casa con lo visto en la sección 6.2.1, es decir, que en el panel B para altos niveles de carga hay un alto porcentaje de grietas desviadas. Las Figuras 7-32 y 7-33 representan un ejemplo de este tipo. Por último, y como diferencia más recarable, existen un gran número de grietas que cerca de la lámina a  $0^\circ$  que se bifurcan y siguen más de un camino, tal y como se aprecia en las figuras 7-34 a 7-38. El hecho de haber nombrado a este tipo de defecto como bifurcación no indica que los dos caminos tengan el mismo origen y se separen, si no que se llama así para indicar la forma, no siendo posible determinar donde se originan.

En las Figuras 7-39 y 7-40 se puede observar como aparte de estas bifurcaciones se pueden dar despegues aislados o que bajo la aplicación de carga han crecido uniéndose con otros y formando grietas en la matriz, Figura 7-41, que, presumiblemente, bajo la aplicación de un nivel de tensión mayor parecen abocados a convertirse en una bifurcación.

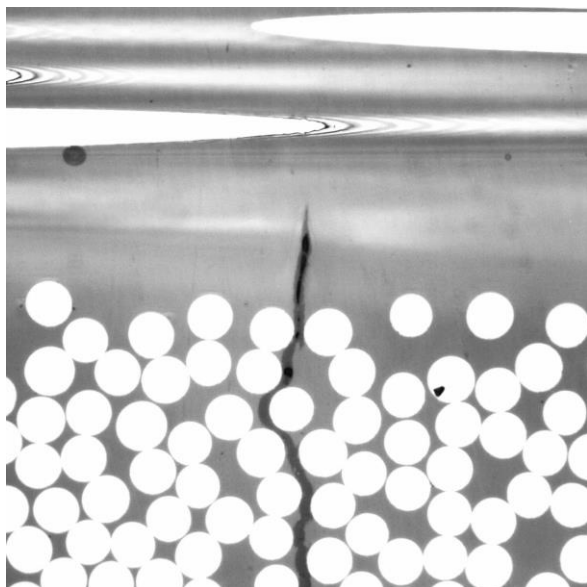


Figura 7-28. Terminación de grieta en la 25B.

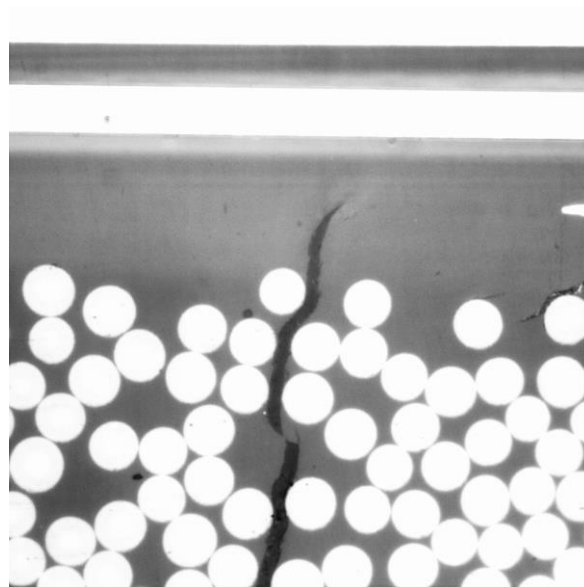


Figura 7-29. Terminación de grieta en la 25B.



Figura 7-30. Terminación de grieta en la 25B.

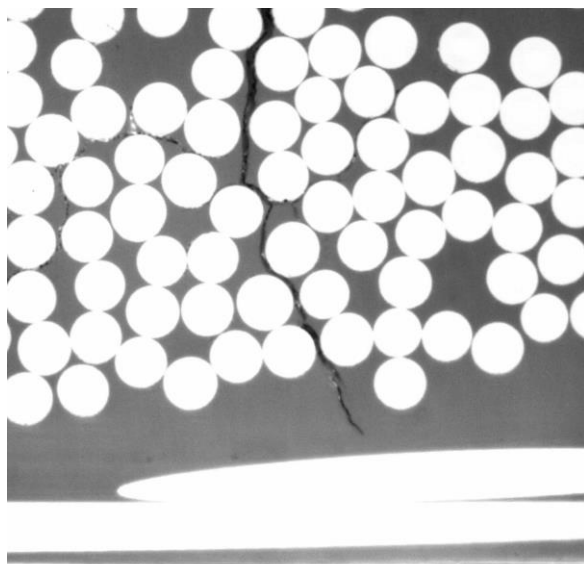


Figura 7-31. Terminación de grieta en la 25B.

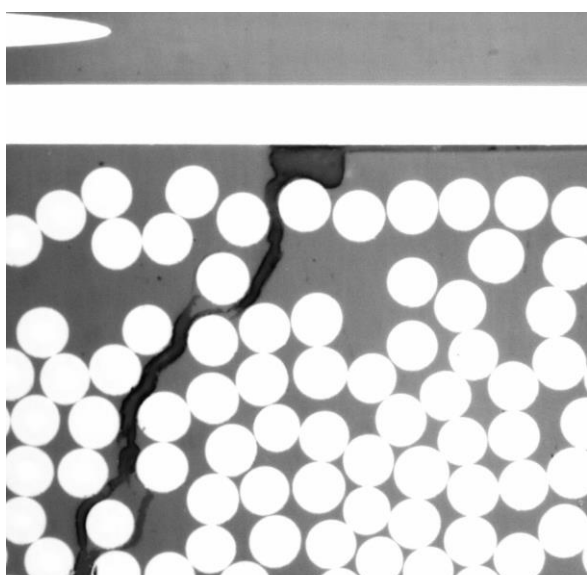


Figura 7-32. Terminación de grieta en la 25B.

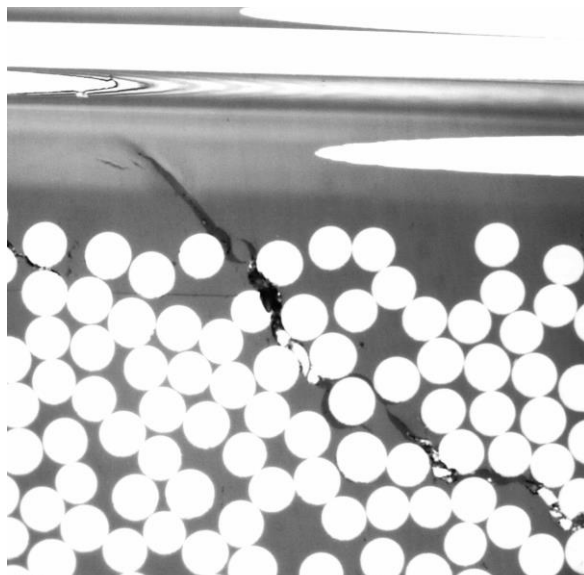


Figura 7-33. Terminación de grieta en la 25B.

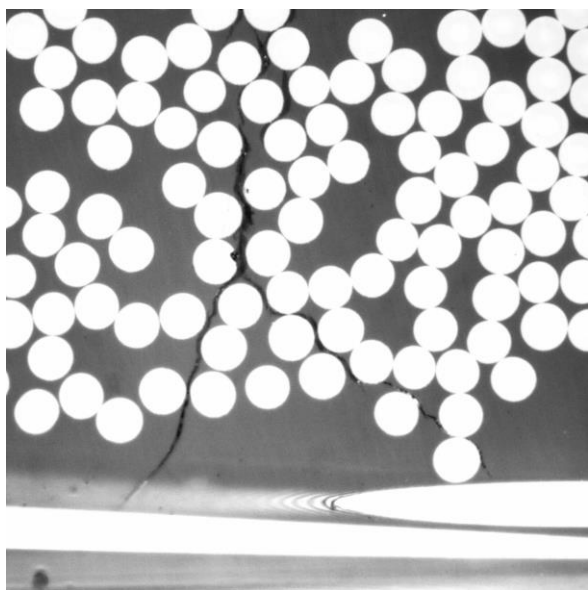


Figura 7-34. Terminación en la 25B.

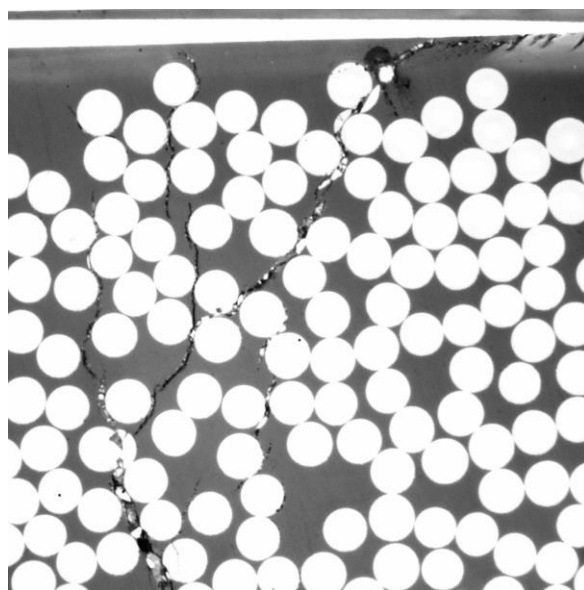


Figura 7-35. Terminación en la 25B.

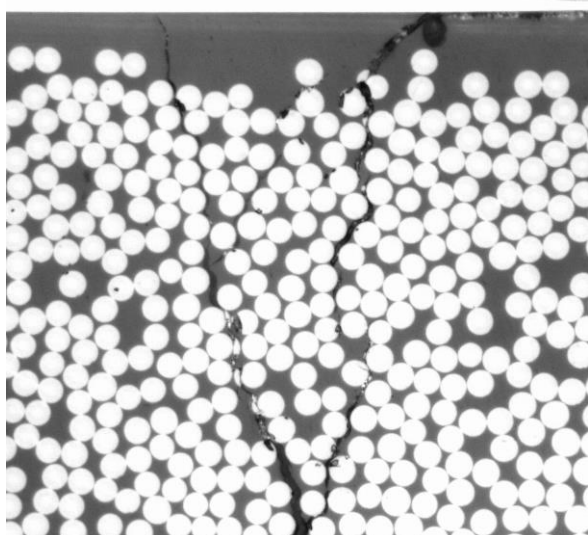


Figura 7-36. Terminación en la 25B.

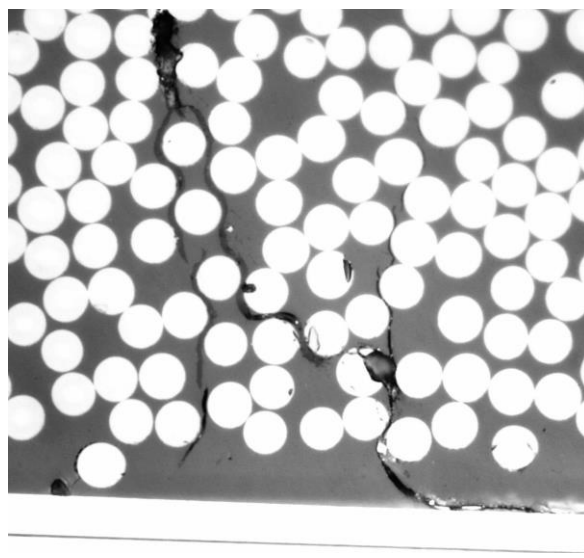


Figura 7-33. Terminación en la 25B.

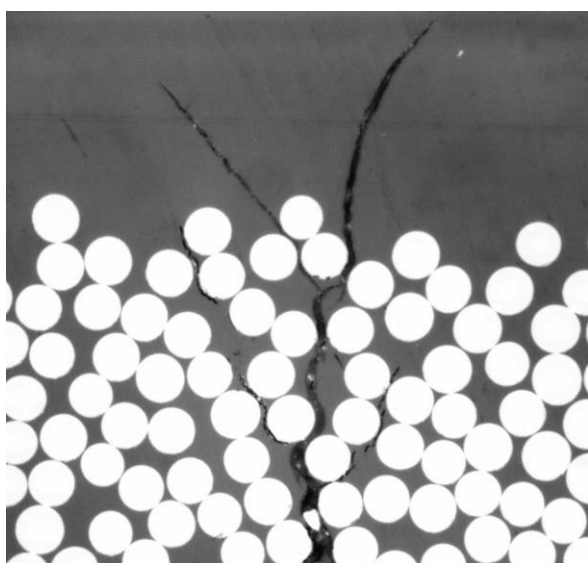


Figura 7-38. Terminación en la 25B.

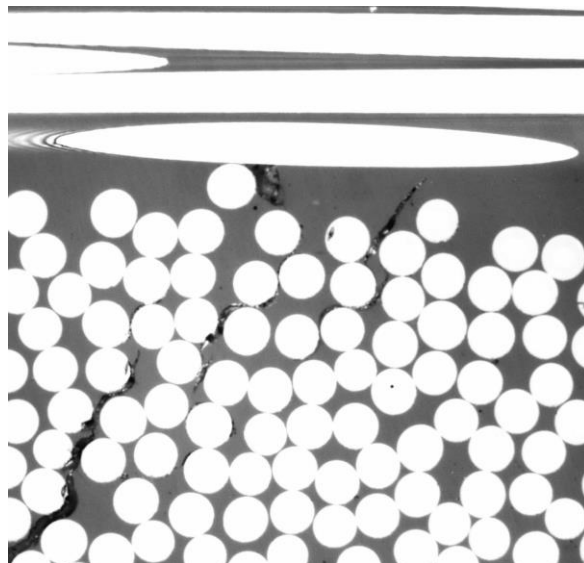


Figura 7-39. Terminación en la 25B.

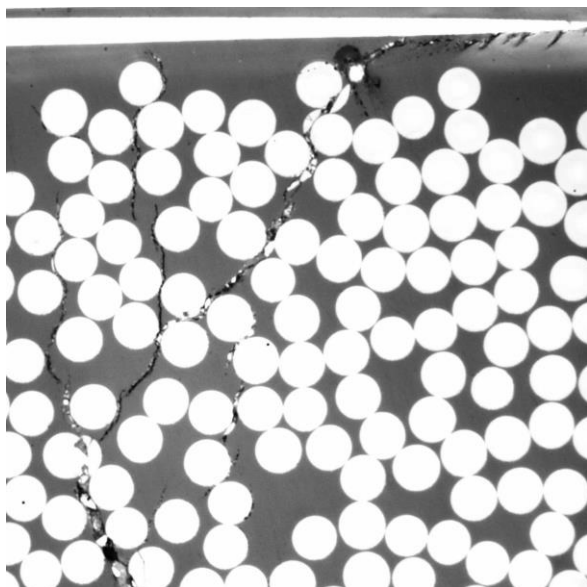


Figura 7-40. Terminación de grieta en la 25B.

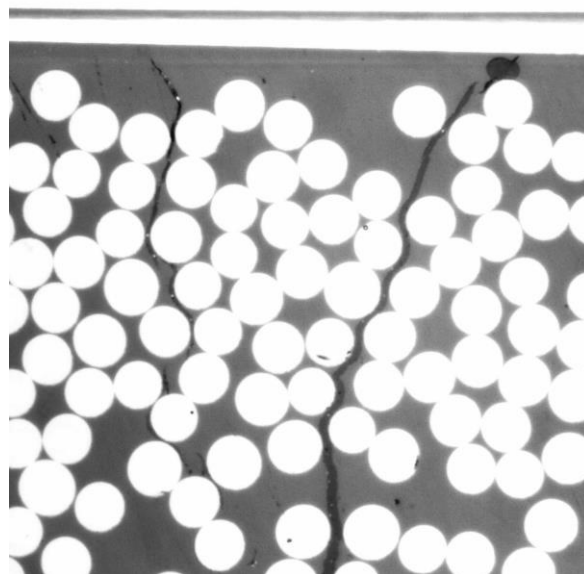


Figura 7-41. Terminación de grieta en la 25B.

Para acabar con el análisis del daño en la zona adyacente a las láminas de  $0^\circ$ , se muestran una serie de micrografías de zonas donde aparecen una serie de despegues aislados de forma consecutiva que crecen avanzando sobre la matriz. Este fenómeno se da únicamente en el panel grueso, tal y como se muestra en las Figuras 7-42 a 7-44. En el panel delgado también hay zonas donde se aprecian despegues aislados cerca de las láminas a  $0^\circ$ , pero estos no aparecen de forma consecutiva ni llegan a extenderse. La Figura 7-45 representa un ejemplo de este tipo.

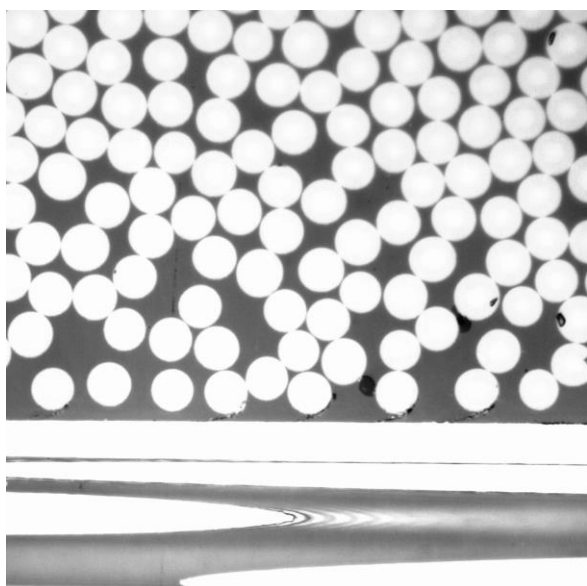


Figura 7-42. Despegues en la 25B.

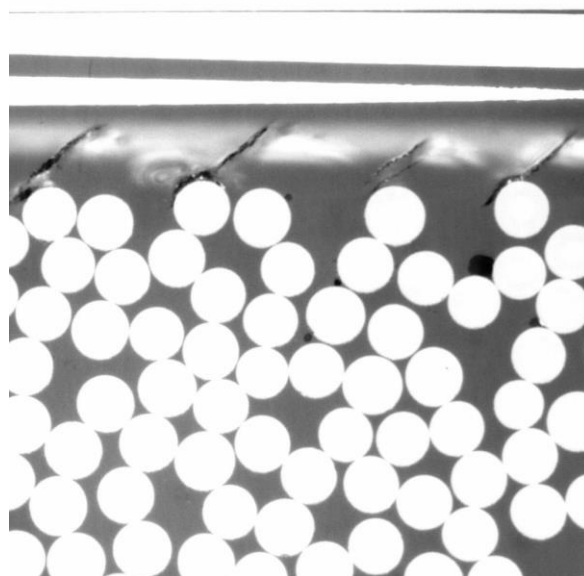


Figura 7-43. Despegues en la 25B.

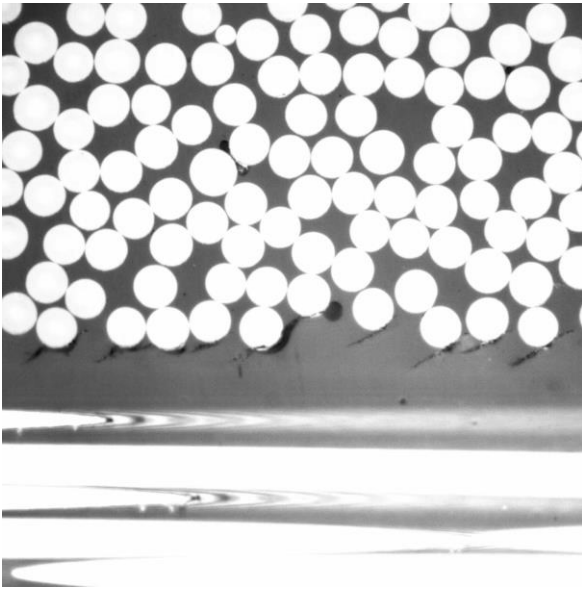


Figura 7-44. Despegues en la 25B.

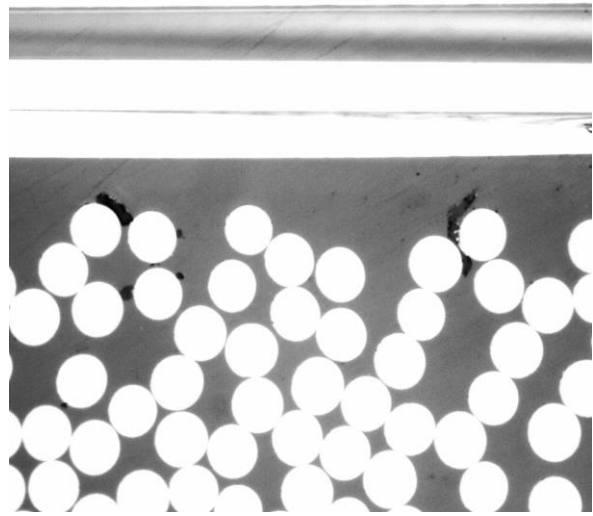


Figura 7-45. Despegues en la 25A.

Se puede concluir por tanto que, aunque para un nivel de carga del 90% de su carga de rotura en el panel grueso,  $[0_2, 90_4]_S$ , aparezcan menos macrogrietas que en el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , tal y como se estudió en la sección 6.1.3, cerca de la interfaz de separación entre las láminas a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  la muestra presenta más daño a mayor escala, contando con un mayor número de delaminaciones y un alto porcentaje de grietas que se bifurcan dando lugar a un mayor daño en la matriz y un mayor número de despegues aislados.

Una vez analizada la zona cercana a las láminas a  $0^\circ$  se pasa a exponer lo observado en la zona central. El estudio del daño sufrido por las muestras bajo consideración se realizará en varias etapas según el tamaño del defecto: desde defectos de pequeño tamaño como despegues aislados hasta bifurcaciones de la grieta como las observadas en las cercanías de la lámina a  $0^\circ$ .

En primer lugar, se comparan las zonas donde se aprecian despegues en la muestra de cada panel, comenzando por los despegues aislados que se aprecian alrededor de una macrogrieta. En el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , los despegues aislados observados alrededor de una macrogrieta son muy cercanos a esta, observándose a una distancia de un diámetro de fibra o bordeando fibras que han sido alcanzadas por la macrogrieta en su extremo opuesto, tal y como se muestra en las Figuras 7-46 a 7-50. A distancias mayores, el primer despegue observado se encuentra a una distancia del orden de 5 diámetros de fibra, tal y como se aprecia en la Figura 7-51, pero sin que aparezca ningún otro tipo de daño visible en sus inmediaciones que lo conecte con la grieta.

En el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , se observan despegues a distancias de un, dos, tres diámetros de fibra de la macrogrieta y además estos no aparecen en solitario si no que se ven acompañados de despegues en las fibras vecinas que se van acercando a la macrogrieta, tal y como se aprecia en las Figuras de 7-52 a 7-57.

Por tanto, en el panel B se da un mayor número de despegues alrededor de la macrogrieta y estos alcanzan una mayor distancia respecto a esta.

Debido a los altos niveles de carga a los que han sido sometidos las muestras, en la mayoría de los casos se aprecia como se ha producido la coalescencia del despegue con fibras vecinas.



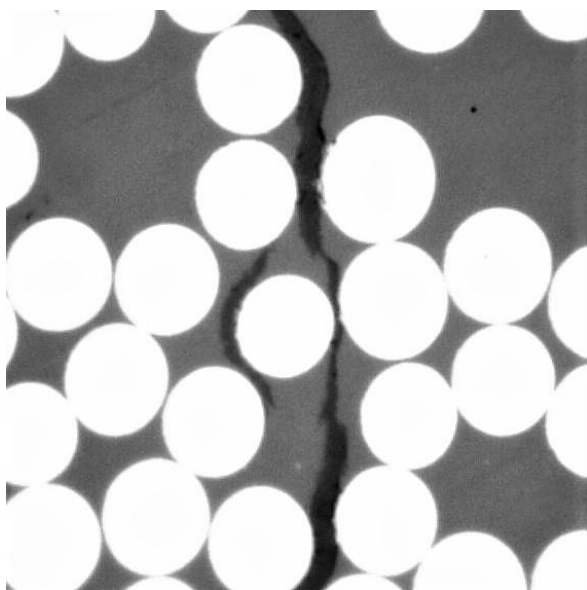


Figura 7-46. Despegue en la 25A.

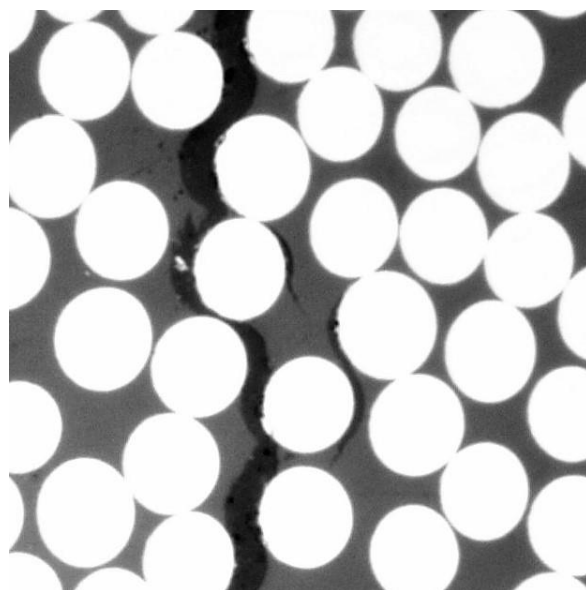


Figura 7-47. Despegue 25A.

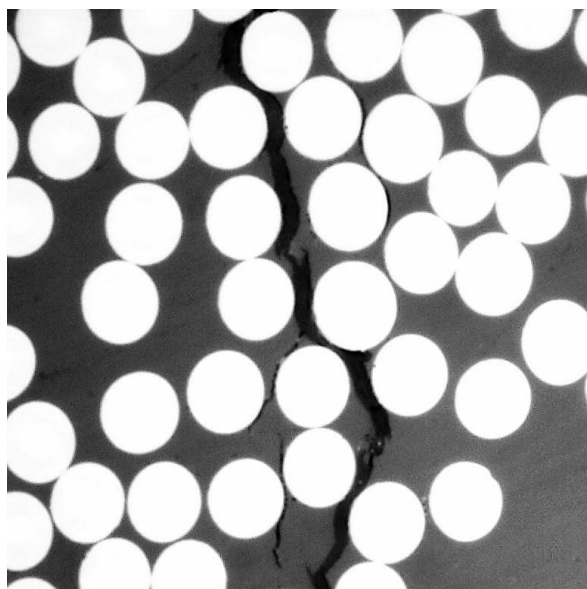


Figura 7-48. Despegue en la 25A.

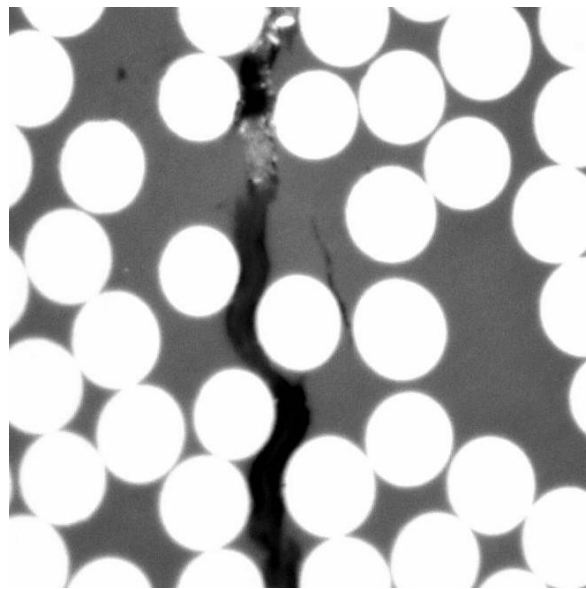


Figura 7-49. Despegue en la 25A.

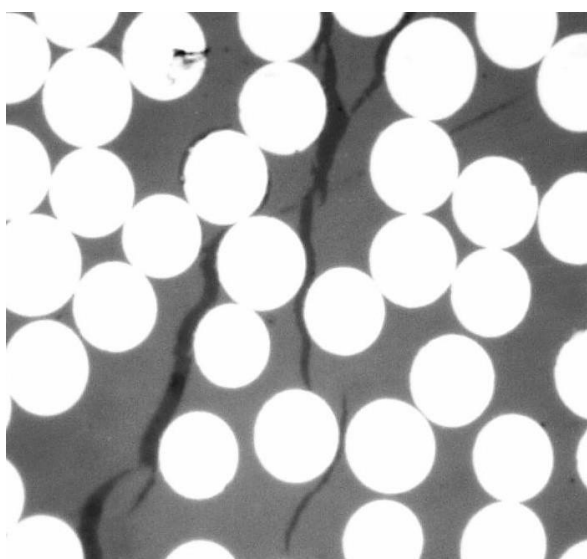


Figura 7-50. Despegues en la 25A.

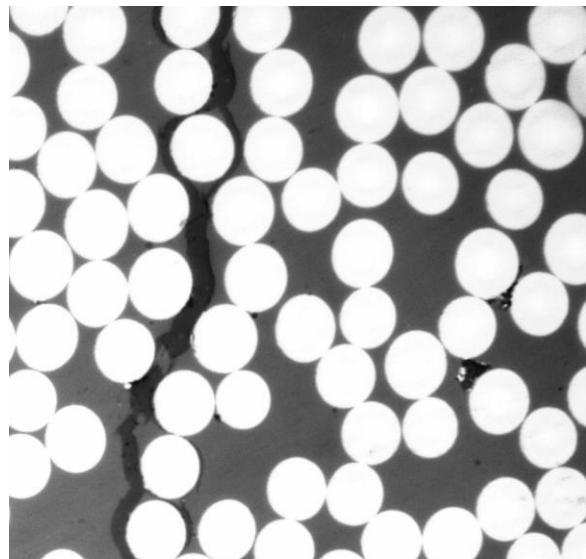


Figura 7-51. Despegues en la 25A.

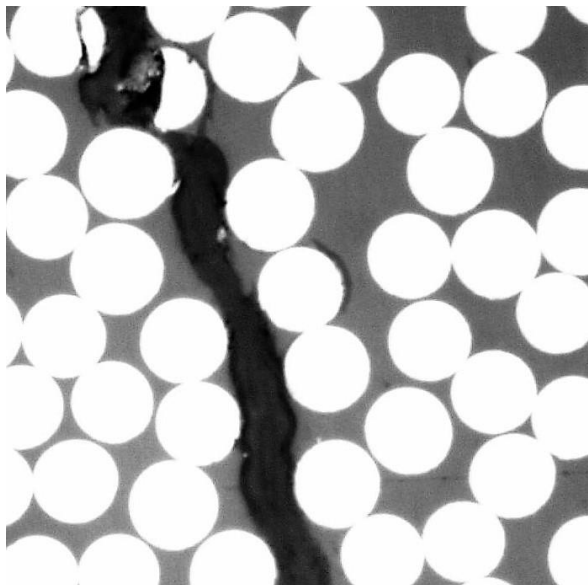


Figura 7-52. Despegue en la 25B.

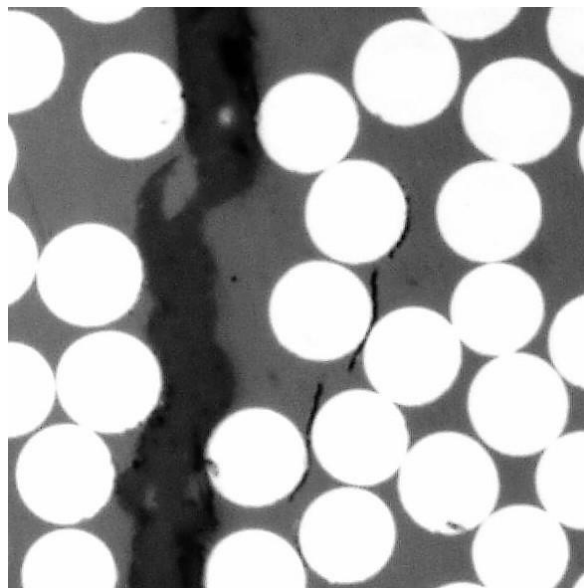


Figura 7-53. Despegue en la 25B.

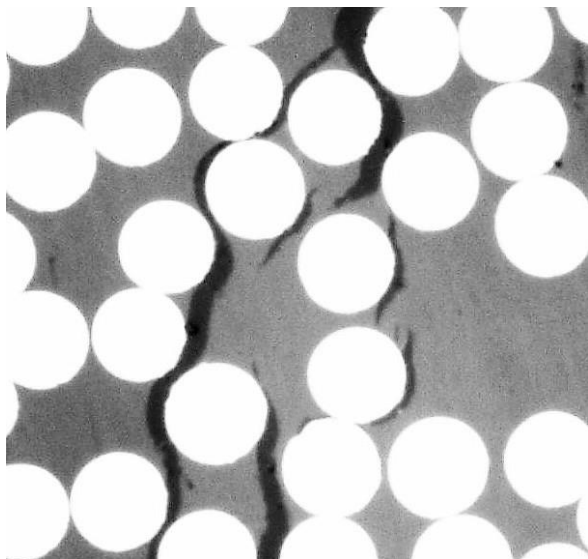


Figura 7-54. Despegue en la 25B.

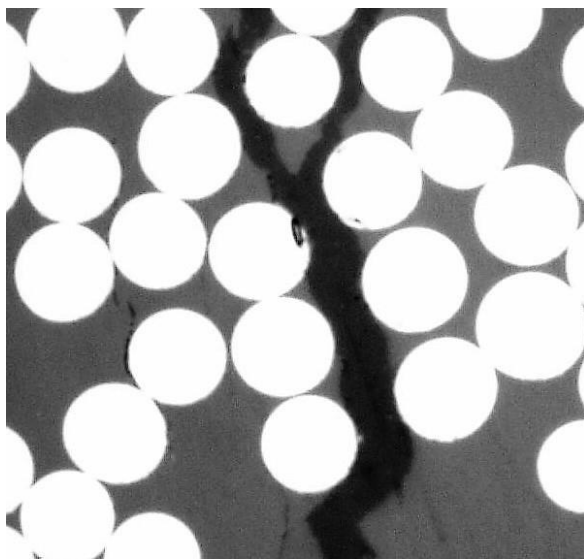


Figura 7-55. Despegue en la 25B.

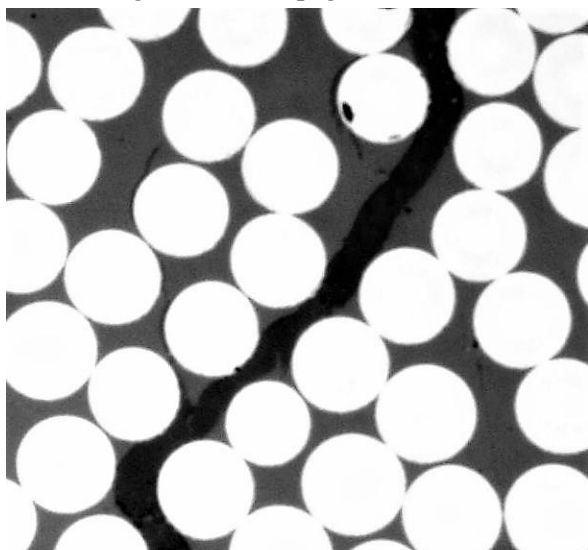


Figura 7-56. Despegue en la 25B.

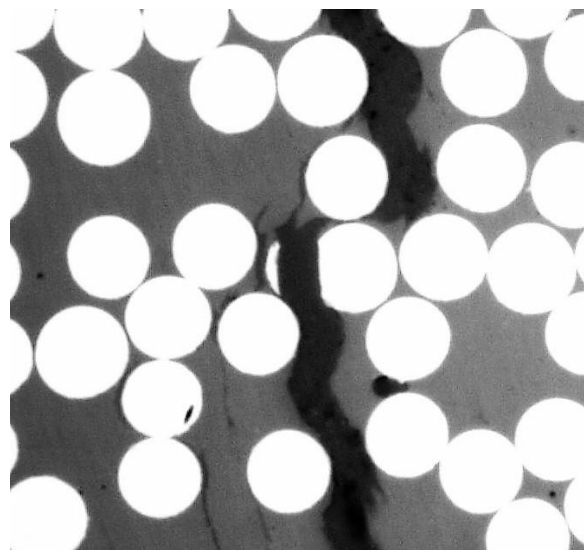


Figura 7-57. Despegue en la 25B.



El siguiente paso a seguir será la observación de microgrietas, es decir, daño que aparece bordeando no ya una sola fibra, si no una serie de fibras consecutivas y rompiendo la matriz, alrededor de las macrogrietas. Las Figuras 7-58 a 7-61 representan micrografías de este tipo de defecto en la muestra 25A. Se observa que al igual que ocurría con los despegues aislados, las microgrietas tienden a propagarse manteniéndose cerca de la grieta, apreciándose sin embargo que alcanzan distancias mayores respecto a la macrogrieta. En el panel B, sin embargo, se vuelven a encontrar dos tendencias: microgrietas cerca de una macrogrieta que transcurren manteniéndose cerca de esta (Figura 7-62 y 7-63) y microgrietas que se abren más (Figuras 7-64 a 7-67).

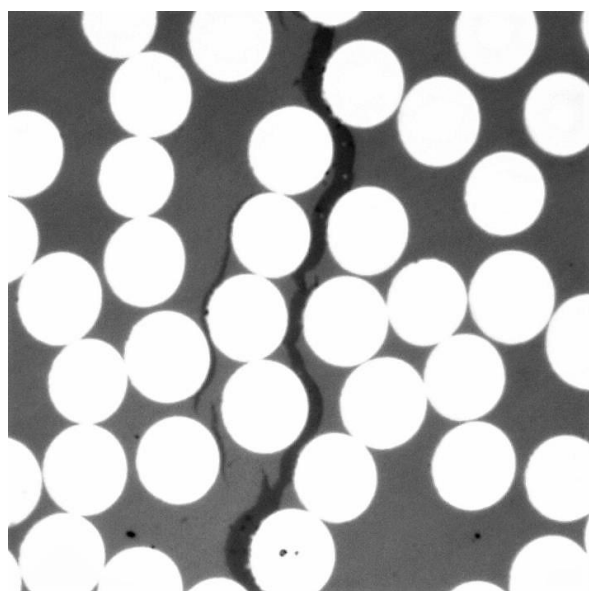


Figura 7-58. Microgrieta en la 25A.

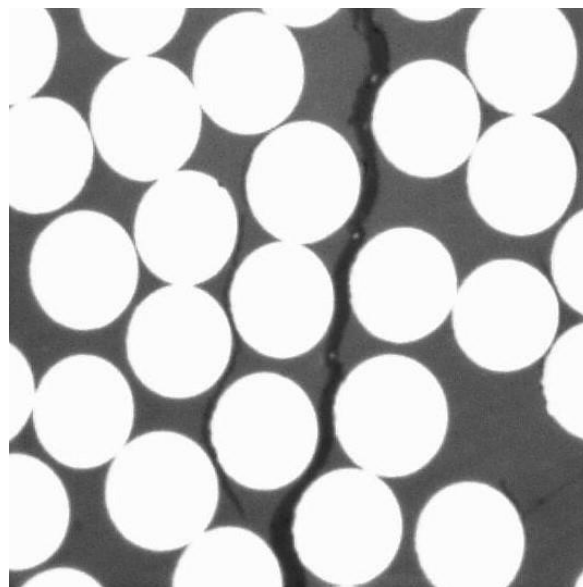


Figura 7-59. Microgrieta en la 25A.

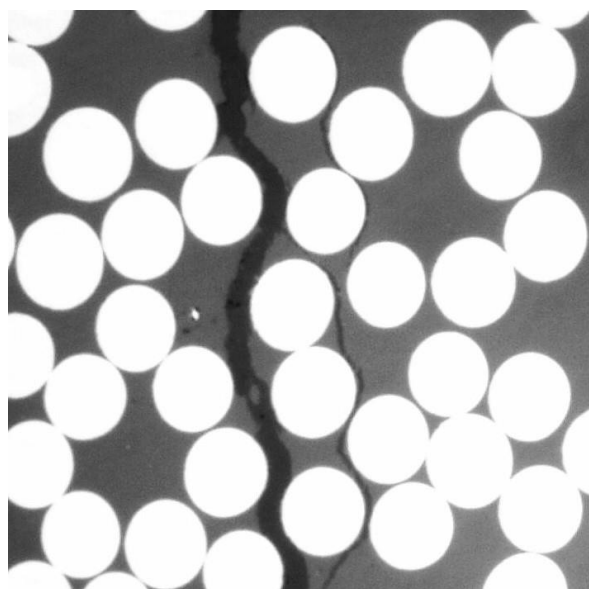


Figura 7-60. Microgrieta en la 25A.

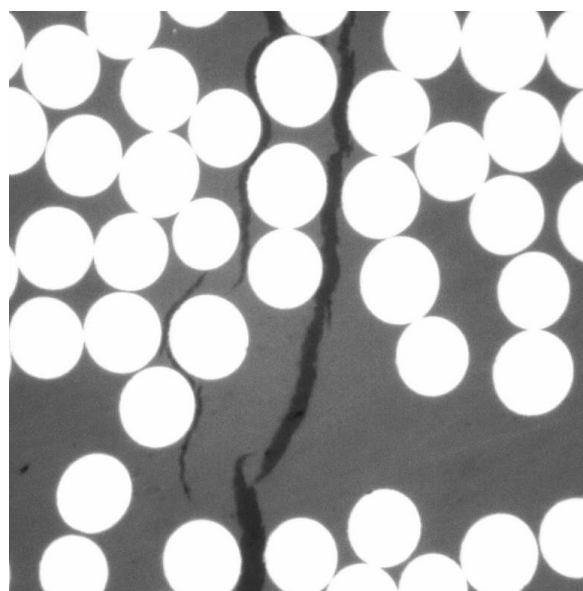


Figura 7-61. Microgrieta en la 25A.

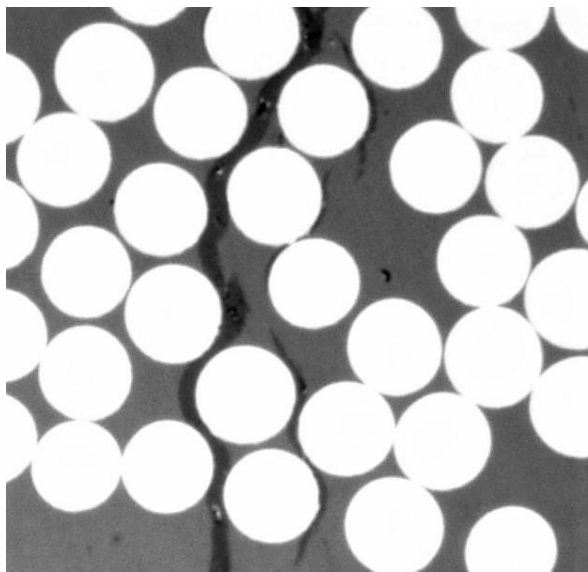


Figura 7-62. Microgrieta en la 25B.

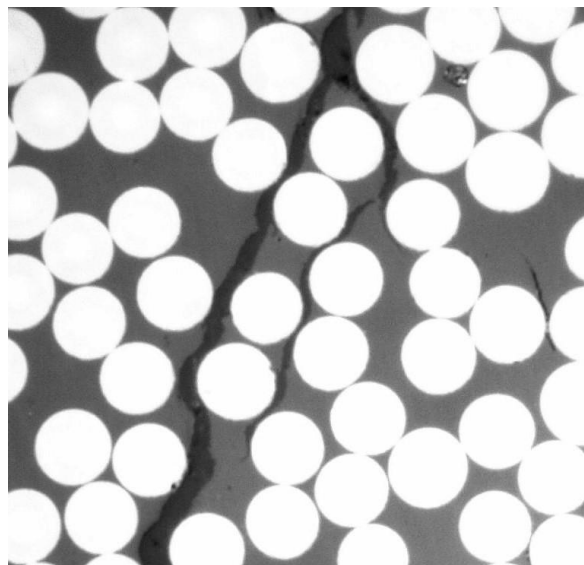


Figura 7-63. Microgrieta en la 25B.

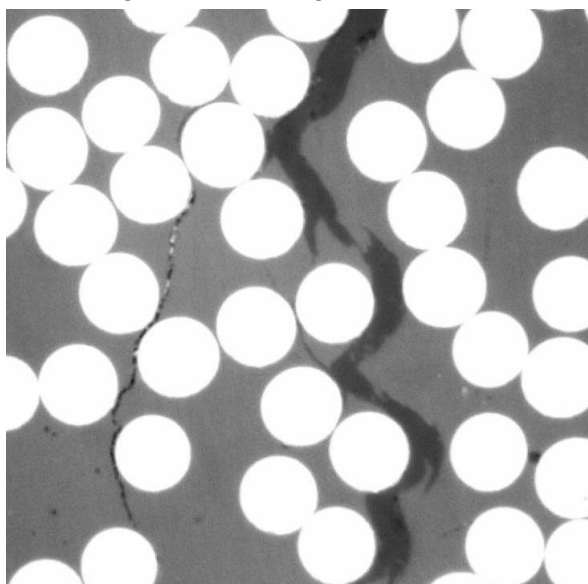


Figura 7-14. Microgrieta en la 25B.

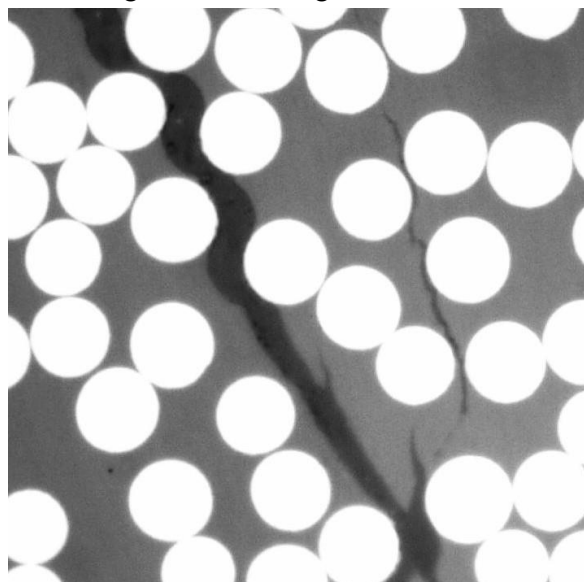


Figura 7-65. Microgrieta en la 25B.

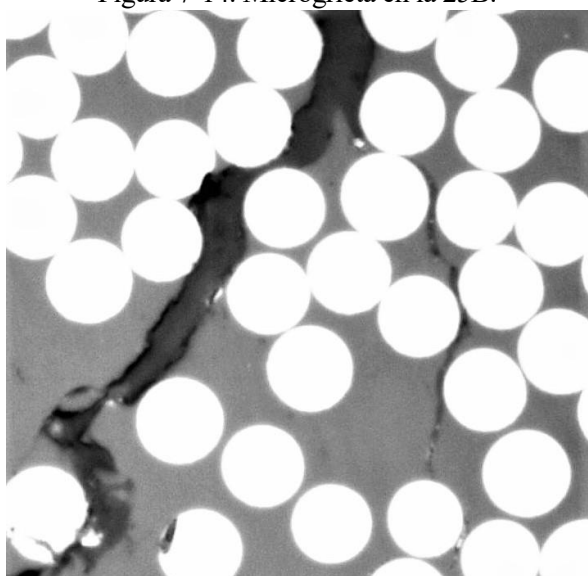


Figura 7-66. Microgrieta en la 25B.

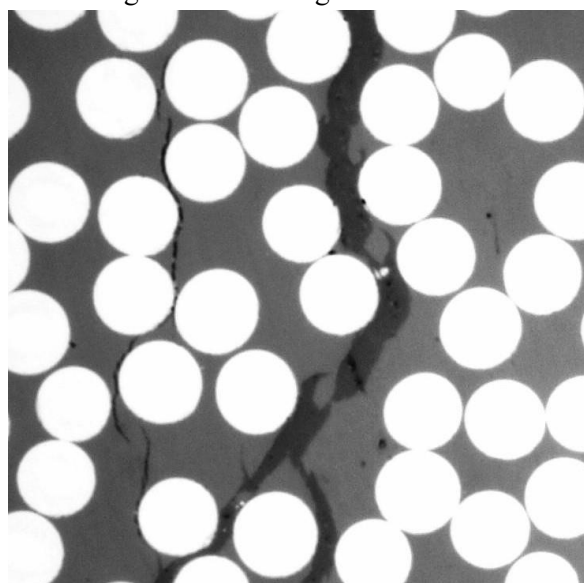


Figura 7-67. Microgrieta en la 25B.

Una vez estudiado como discurren lo que se han denominado como microgrietas se estudia como discurren las macrogrietas en cada uno de los paneles. Para hacerlo, se pasará a explicar las diferentes tendencias encontradas en cada panel y a continuación, se compararán.

En el panel A la mayor aparte de las grietas sigue una tendencia continua (Figura 7-68), sin bifurcarse ni apreciarse mayor daño a su alrededor que los despegues o microgrietas ya comentados.

Una desviación que presentan este tipo de grietas de su camino continuo es cuando se forman de forma bilateral alrededor de una fibra rodeándola (Figura 7-69). Aún así, se considerará que este tipo de defecto, en la que la grieta se desarrolla a través de despegues bilaterales, ya sea a través de una fibra o de un número mayor, como una grieta continua.

Se consideran bifurcaciones a microgrietas de menor o mayor espesor que están conectadas con la grieta transversal.

A pesar de encontrarse en menor cantidad, también se aprecia en este laminado para la muestra ensayada al 90% de carga grietas que se bifurcan, tal y como muestran la figuras 7-70 y 7-71. En ambas bifurcaciones, al igual que en todas las observadas, se da que aunque la macrogrieta aparezca dividida en dos caminos a través de la fibra, apreciándose mayores distancias entre ambos que con las microgrietas observadas en el presente apartado, ambos siempre transcurren cerca, a una distancia máxima de cuatro diámetros de fibra. Además, estas bifurcaciones se unen a la macrogrieta mediante un despegue bilateral en una fibra.

El último tipo de grieta observado en este panel son las grietas transversales incompletas, ya tenidas en cuenta en el presente documento como un factor que puede tener influencia en la resistencia de los laminados. Este tipo de grietas están formadas por dos fragmentos de grietas continuas que discurren acercándose en su recorrido aunque sin llegar a encontrarse. Al igual que en las bifurcaciones, la distancia máxima observada entre dos segmentos de grieta que transcurren sin llegar a encontrarse es de unos 4 diámetros de fibra.

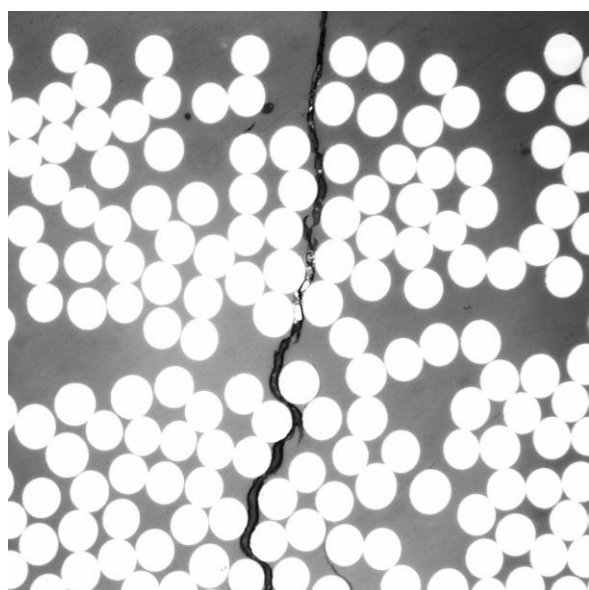


Figura 7-68. Grieta continua en la 25A.

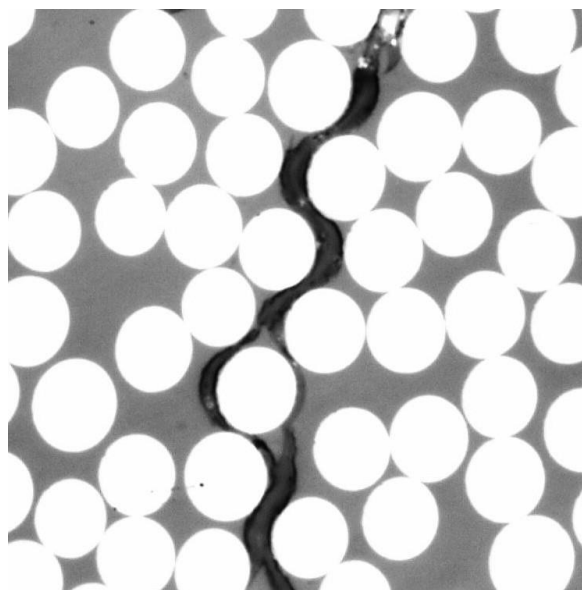


Figura 7-69. Despegue bilateral en la 25A.

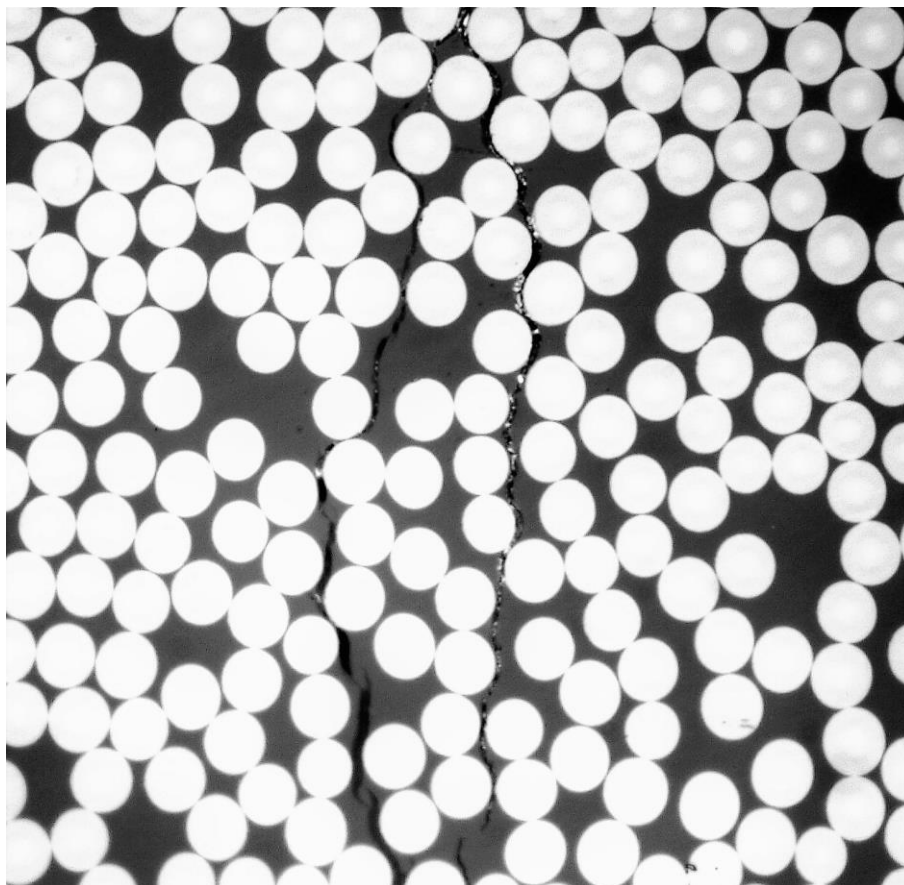


Figura 7-70. Bifurcación en la 25A.

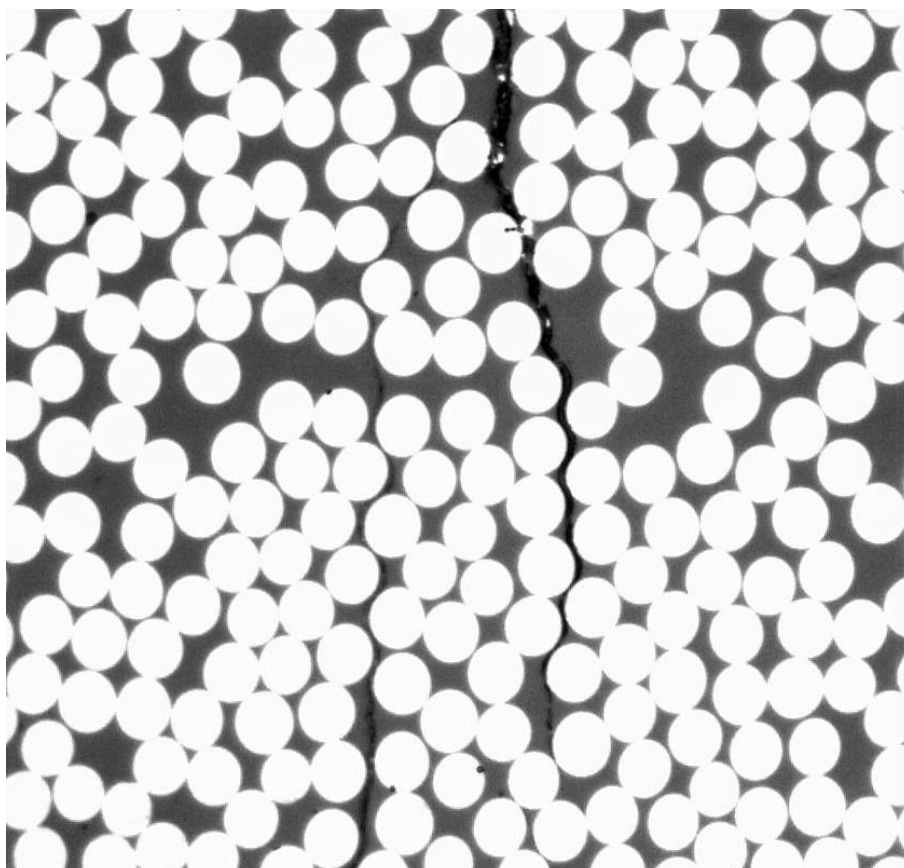


Figura 7-71. Bifurcación en la 25A.

En cuanto al panel B, ya no se observa una tendencia clara de las grietas a seguir un camino continuo. Se encuentran ahora, en proporciones similares, grietas que siguen un camino continuo de extremo a extremo de la sección, sin ningún daño alrededor o si lo hay despegues o microgrietas, y grietas que se bifurcan en varias ramas. Las Figuras 7-72 y 7-73 representan ejemplos del primer tipo. En la Figura 7-73 aparece un ejemplo de grieta continua que se ha desarrollado mediante despegues bilaterales a través de más de una fibra.

En cuanto al segundo tipo, grietas que se bifurcan presentando varias ramas, se observa que las distancias alcanzadas por estas ramas respecto a la macrogrieta son mayores que en el panel A. En las Figuras 7-74 y 7-76 se representan ejemplos de bifurcación de una macrogrieta que transcurre manteniéndose cerca sin alcanzar una gran distancia respecto a esta, mientras que las Figuras 7-76 y 7-77 representan una misma bifurcación que transcurre alcanzando una mayor distancia de la apreciada hasta ahora. Es como si esta rama trascurriera alejándose de la macrogrieta, en contra de lo observado hasta ahora donde parecía que el daño tendía a acercarse. Al hablar en términos de recorrido de las grietas no se podrá especificar si dos fragmentos están acercándose o alejándose pues para determinarlo habría que saberse en que punto comenzó cada fragmento de grieta. Lo que si se puede concluir es que el daño alcanza una mayor distancia respecto a la macrogrieta.

Se observa también que en el panel B las grietas se bifurcan en un mayor número de ramas que las grietas del panel A.

En cuanto a las grietas transversales incompletas se aprecia aquí la misma tendencia: dos fragmentos de grieta transcurren de manera continua acercándose en su recorrido pero sin llegar a encontrarse. Las distancias máximas encontradas ahora entre los fragmentos también es mayor.

Por último, en el análisis del daño a través de las grietas se analiza la existencia de roturas de fibra. En las micrografías expuestas se ve como las grietas se desarrollan en general bordeando las fibras del laminado, sin embargo hay grietas que provocan la rotura de fibras en su camino. Sin embargo, en la comparación entre ambos paneles no se ha observado una mayor cantidad de este defecto en uno que en otro. Las Figuras 7-81 y 7-82 representan ejemplos de lo observado en el panel A y las Figuras 7-83 a 7-85 de ejemplos en el panel B.

Por tanto, el análisis realizado del daño alrededor de una macrogrieta permite concluir que este se extiende a una mayor distancia en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , que en el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ . Además, el hecho de que haya un mayor número de grietas que se bifurcan es un indicador de que alrededor de la grieta la matriz está más dañada en el panel B.

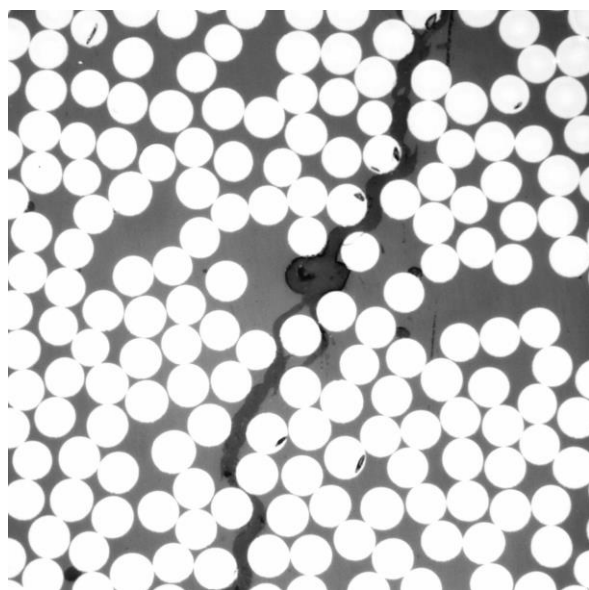


Figura 7-72. Grieta continua en la 25B.

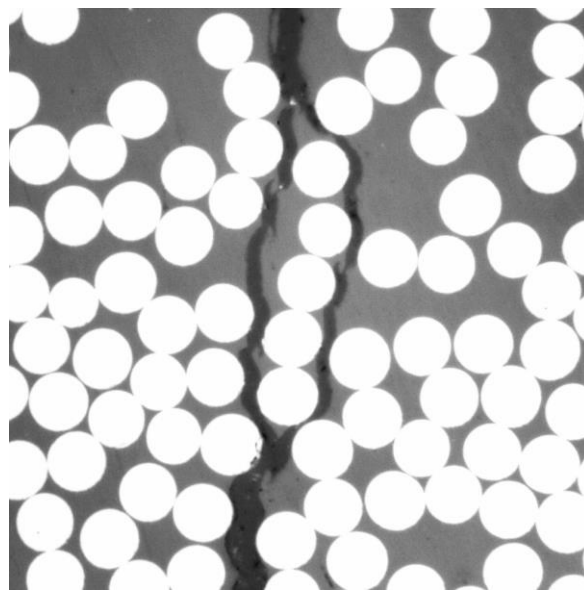


Figura 7-73. Grieta continua en la 25B.

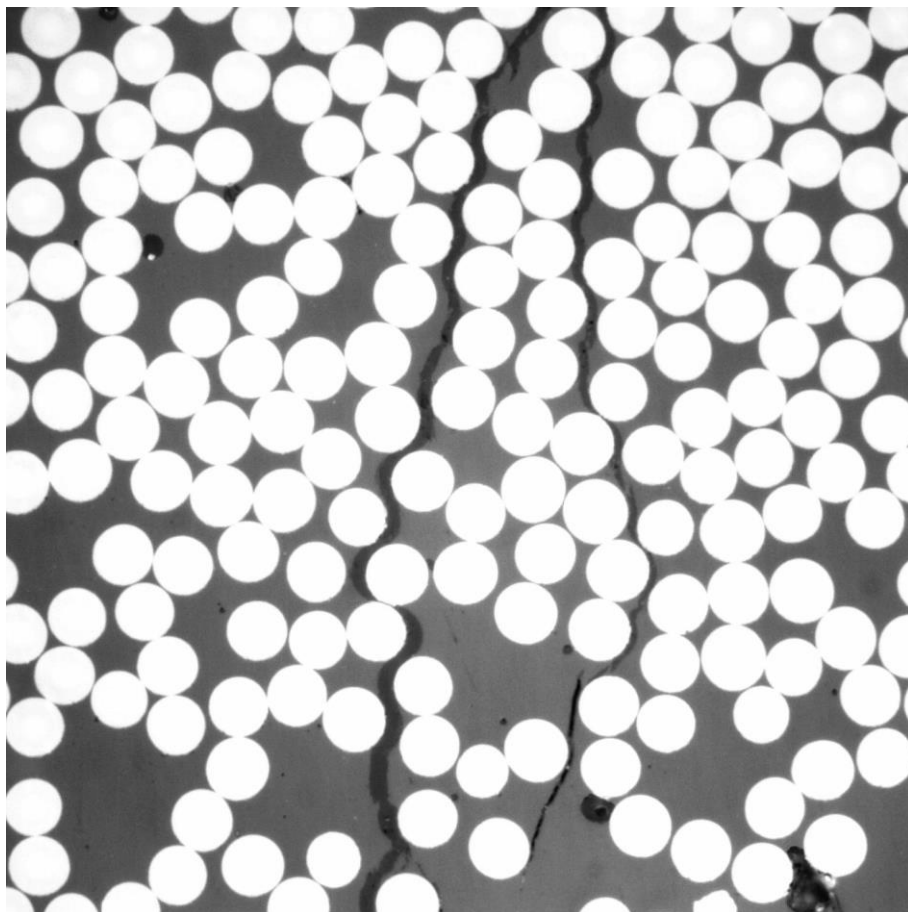


Figura 7-74. Bifurcación en la 25B.

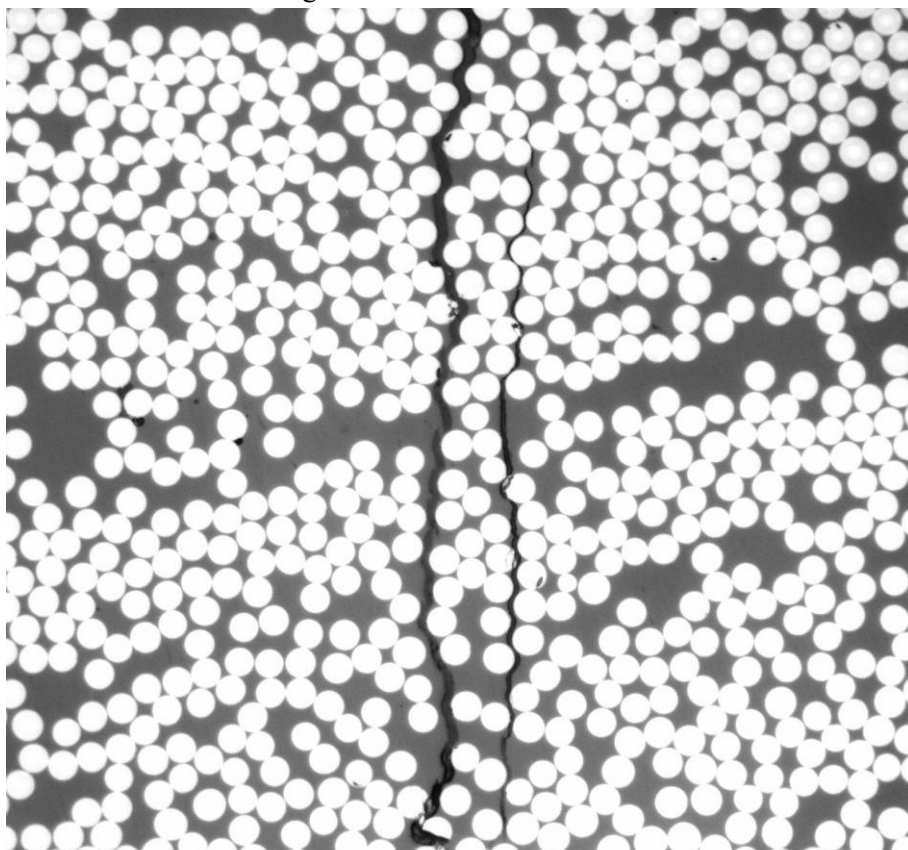


Figura 7-75. Bifurcación en la 25B.

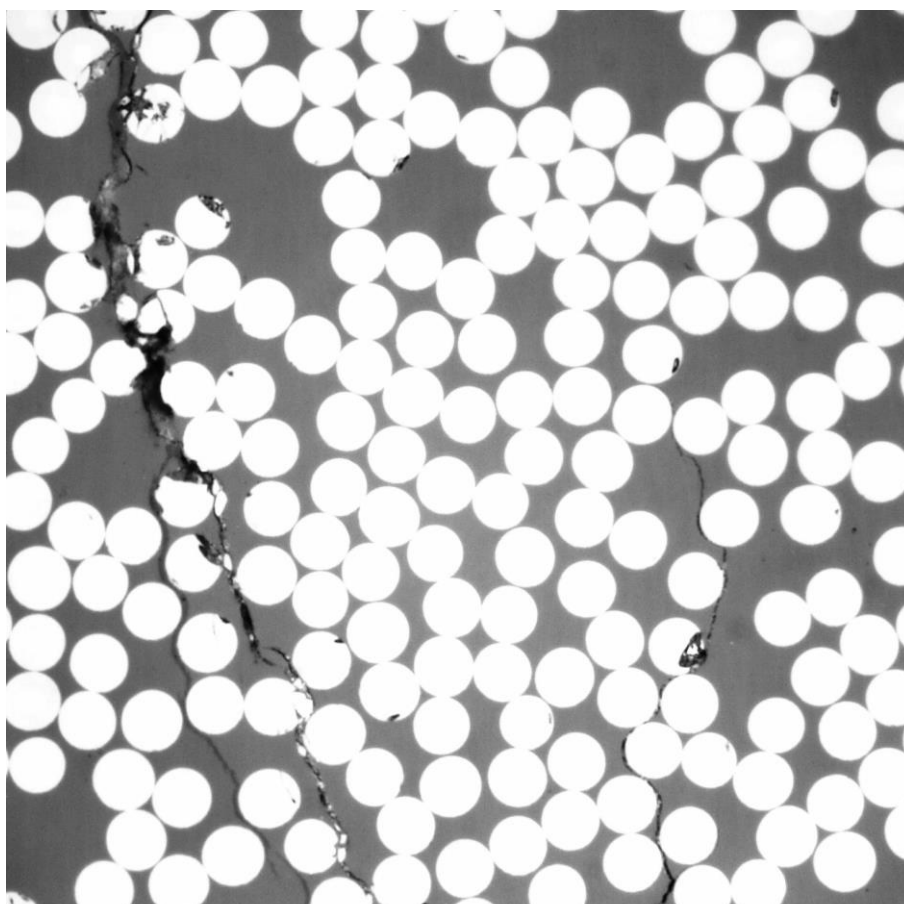


Figura 7-76. Bifurcación en la 25B

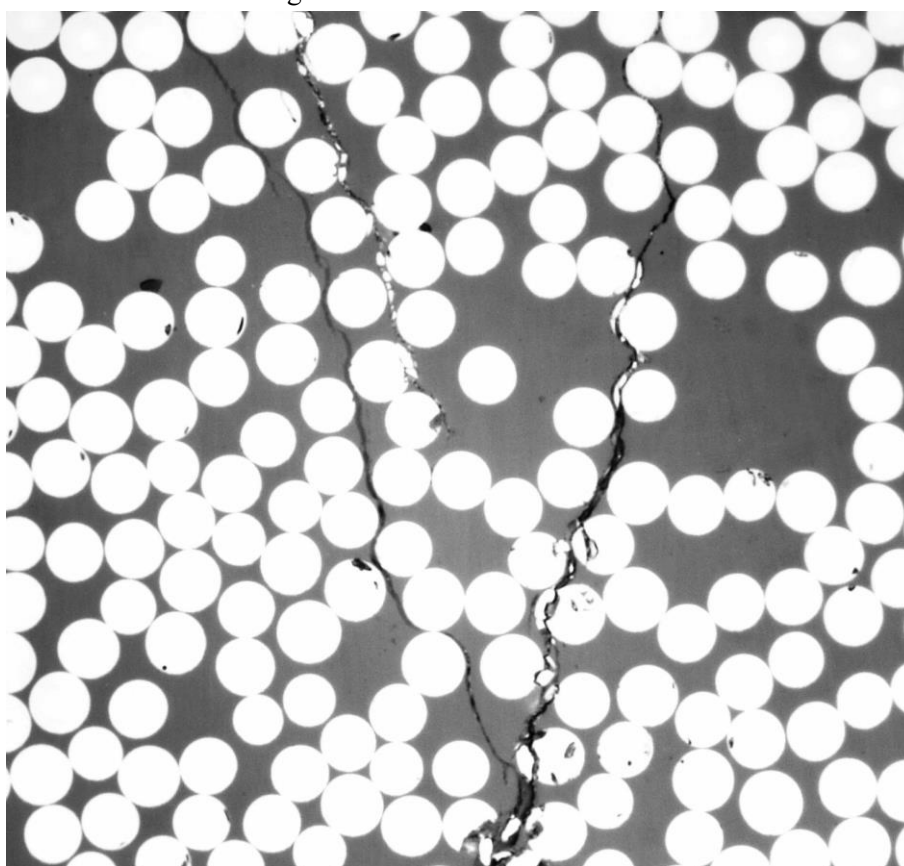


Figura 7-77. Bifurcación en la 25B.



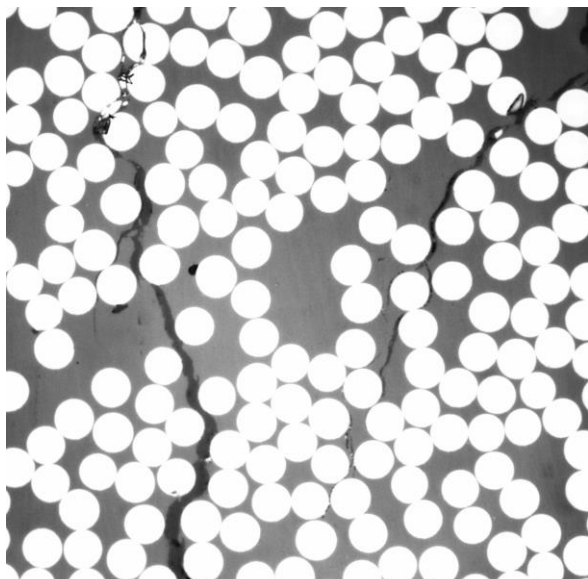


Figura 7-78. Grieta discontinua en la 25B.

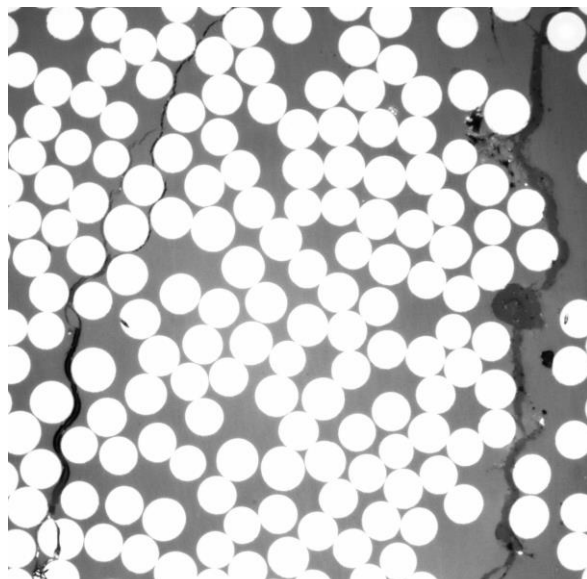


Figura 7-79. Grieta discontinua en la 25B.

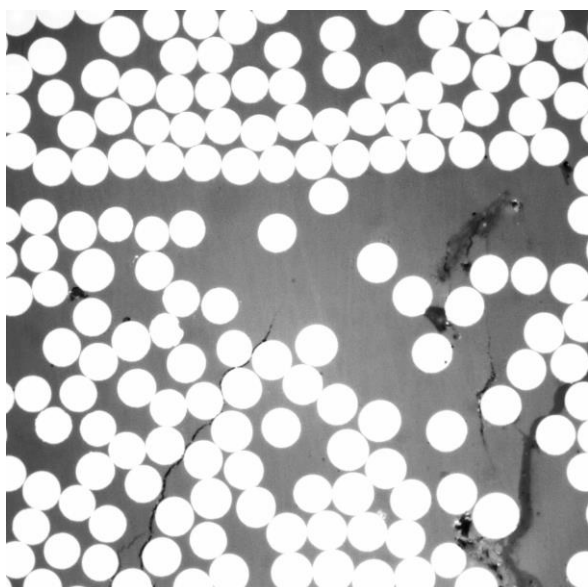


Figura 7-80. Grieta discontinua en la 25B.

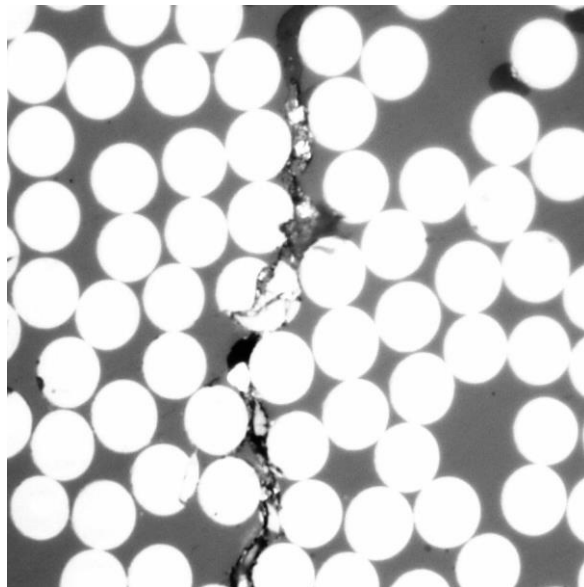


Figura 7-81. Rotura de fibra 25A.

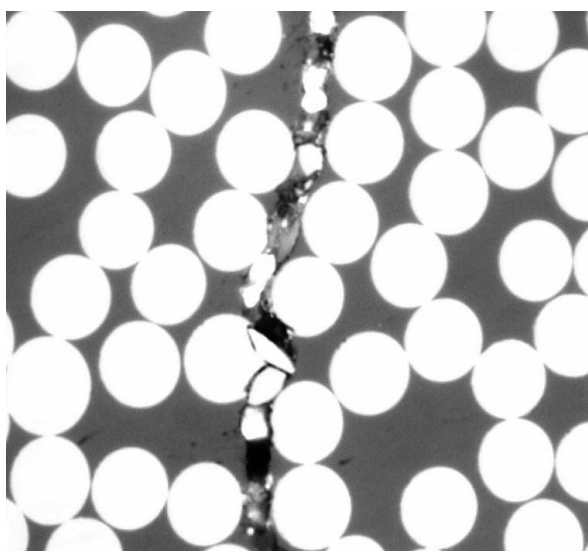


Figura 7-82. Rotura de fibra 25A.

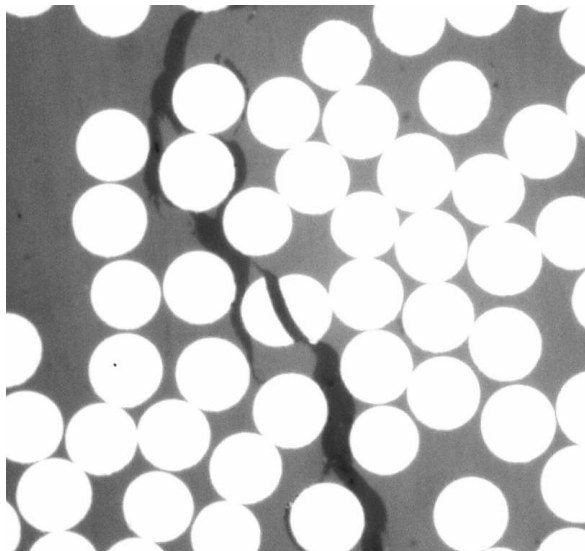


Figura 7-83. Rotura de fibra 25B.



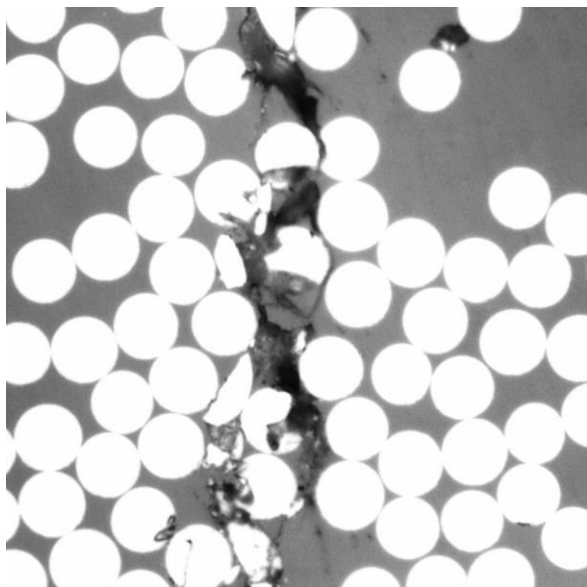


Figura 7-84. Rotura de fibra 25B.

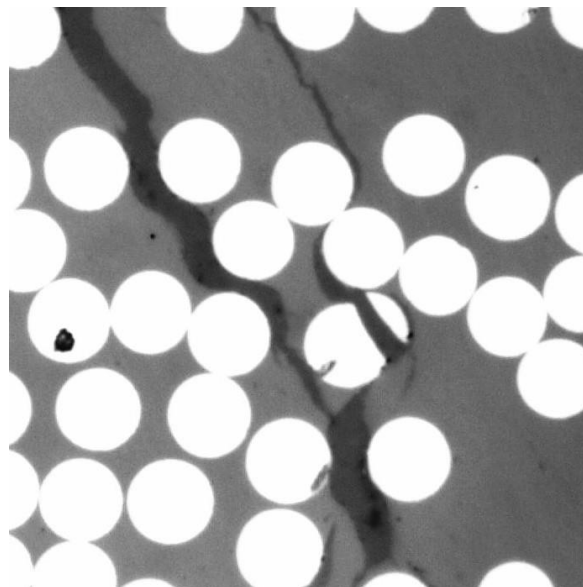


Figura 7-85. Rotura de fibra 25B.

Una vez estudiado como se producen los mecanismos de daño alrededor de las macrogrietas, se analiza el resto de la sección de las láminas a 90°.

En primer lugar, se muestran una serie de imágenes correspondientes a el tipo de daño nombrado como grieta incompleta y que cuyo estudio se ha tenido en cuenta en la sección 6.2.3. Este tipo de defecto, que alcanza distintos tamaños, se puede ver en las muestras de ambos laminados. En la sección mencionada se vio que la densidad de este defecto en cada panel es, para las muestras ensayadas al 90% de carga, de 0.2888 grietas por centímetro en el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , frente a 2.41 grietas por centímetro en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ . Es decir, respecto a este tipo de defecto se aprecia también un mayor daño en el panel B que en el panel A. En las Figuras 7-86 a 7-89 se ven muestras este tipo de daño para la muestra 25A y en las Figuras 7-90 a 7-93 para la muestra 25B. Se aprecia como estas grietas se presentan siempre cerca de las láminas de 0°. En la sección central se aprecian despegues e incluso casos en los que estos se extienden a las fibras vecinas, pero no más allá de dos fibras. Sin embargo, en la Figura 7-93 se aprecia un caso aislado encontrado en la muestra 25B en el que se observado como los despegues se han propagado de manera paralela a la carga. Este es el único caso de lo considerado como microgrieta que se extiende sin llegar a la lámina a 0° en estas muestras.

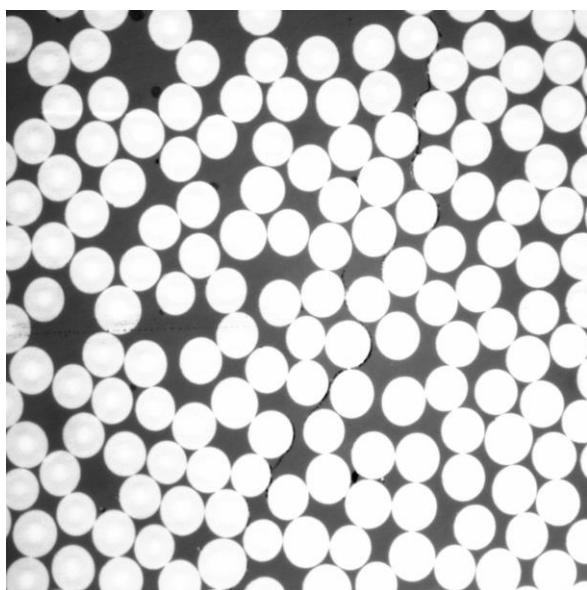


Figura 7-86. Grieta incompleta en la 25A.

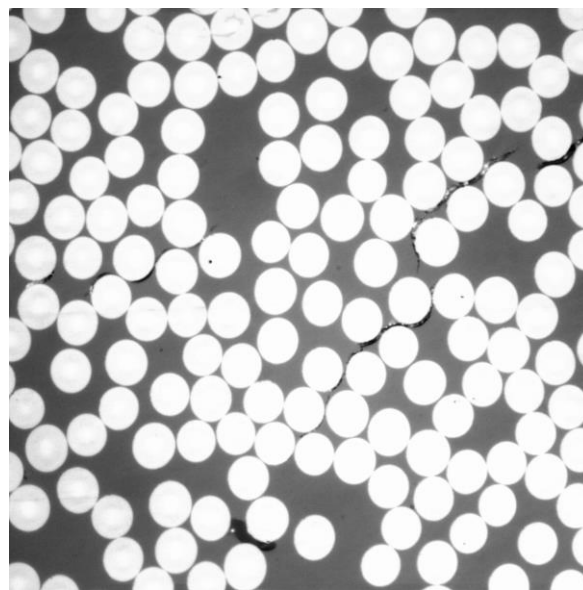


Figura 7-87. Grieta incompleta en la 25A.

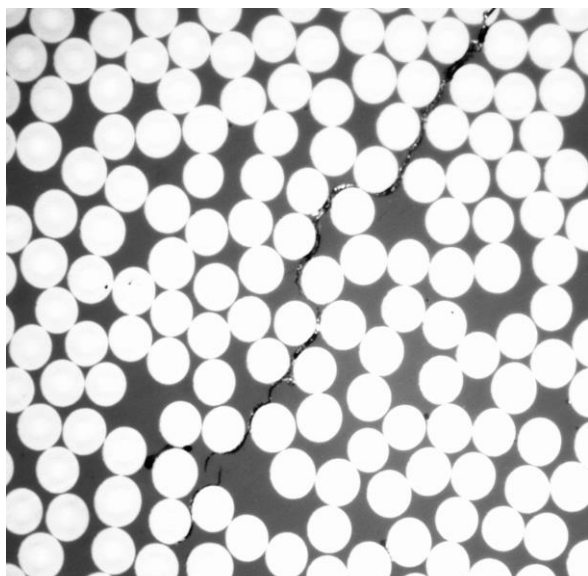


Figura 7-88. Grieta incompleta en la 25A.

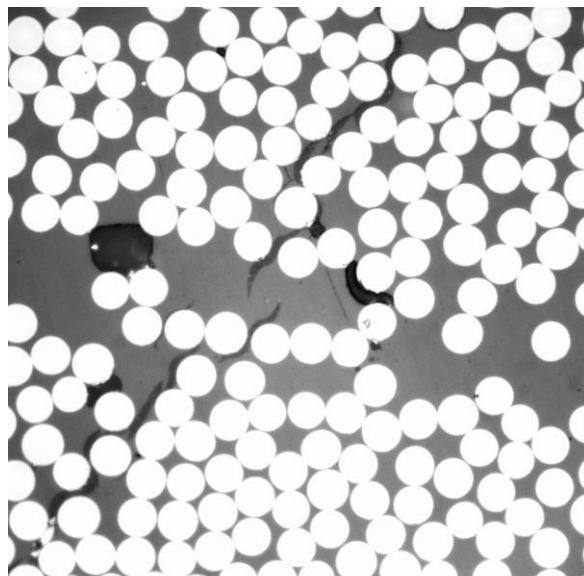


Figura 7-89. Grieta incompleta en la 25A.

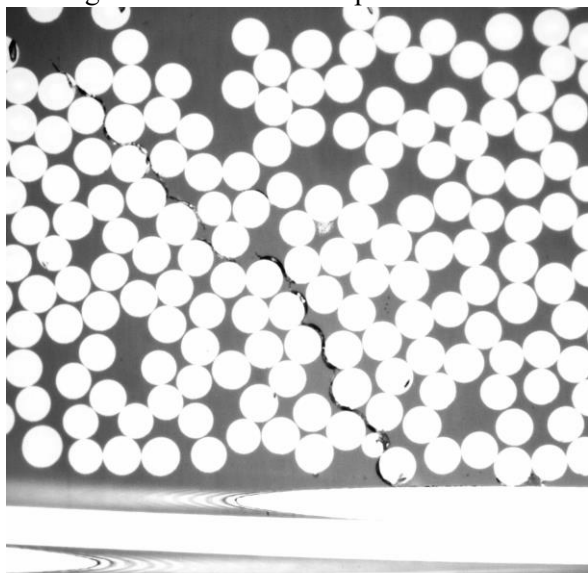


Figura 7-90. Grieta incompleta en la 25B.

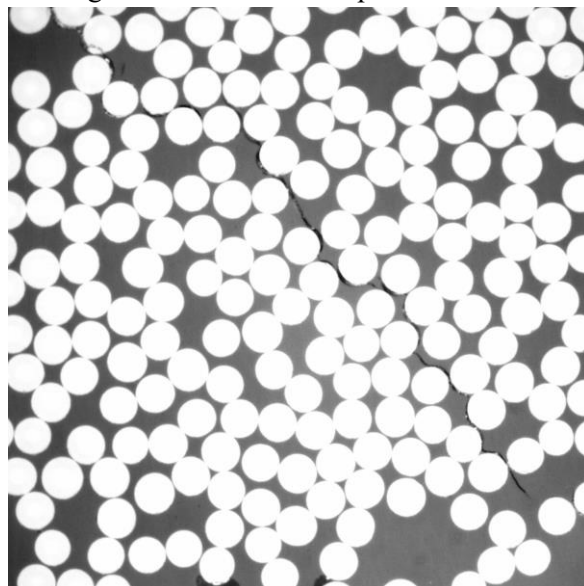


Figura 7-91. Grieta incompleta en la 25B.

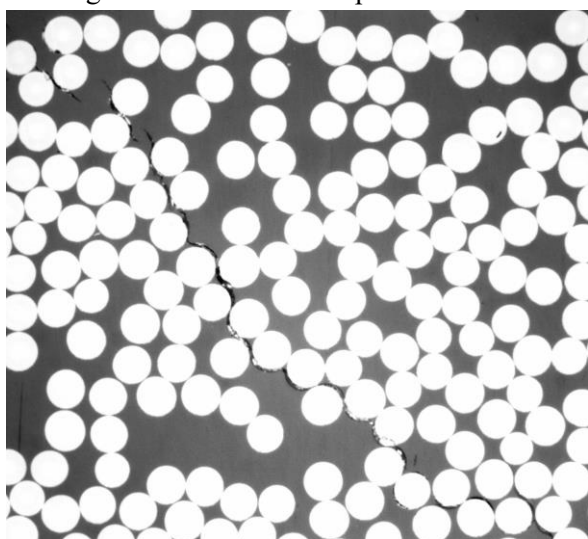


Figura 7-92. Grieta incompleta en la 25B.

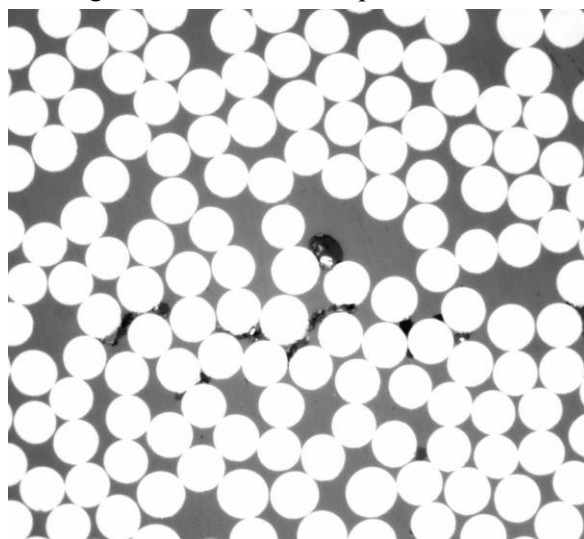


Figura 7-23. Despegues en la 25B.

A continuación se muestran figuras de defectos que se han encontrado de forma indistinta en la sección a  $90^\circ$  para las muestras correspondientes a cada panel, como despegues aislados o defectos con forma de porosidad que, bajo el nivel de análisis del presente proyecto, no son posibles de clasificar en función de si son consecuencia de la aplicación de carga o de defectos del material. Las Figuras 7-94 a 7-97 presentan ejemplos del panel A, mientras que las Figuras 7-98 a 7-101 se corresponden con el panel B.

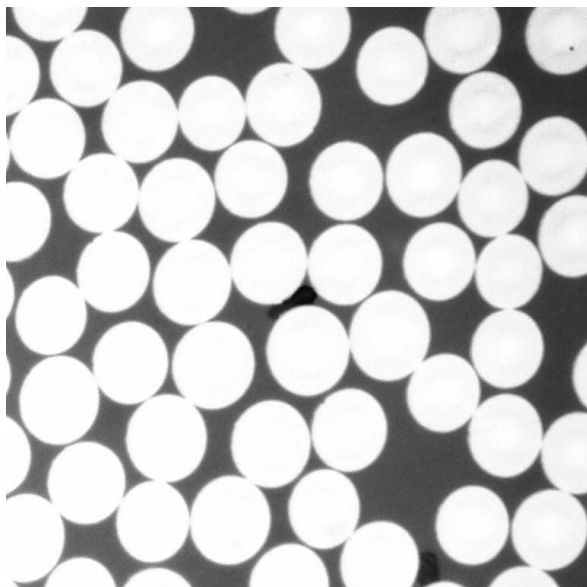


Figura 7-94. Poro en la 25A.

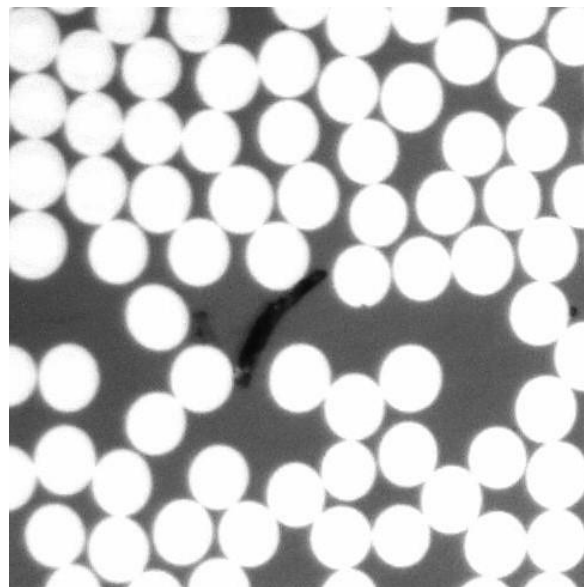


Figura 7-95. Poro en la 25A.

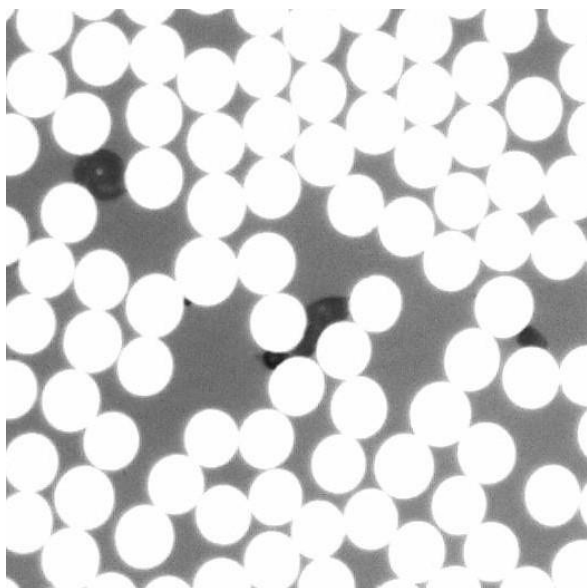


Figura 7-96. Poro en la 25A.

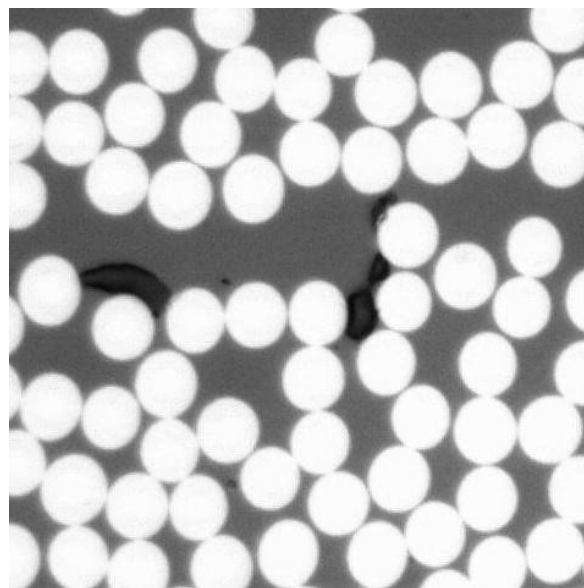


Figura 7-97. Poro en la 25A.

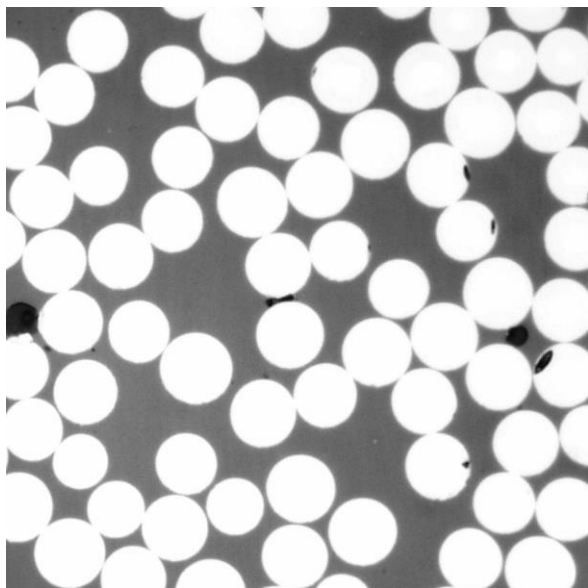


Figura 7-98. Poro en la 25B.

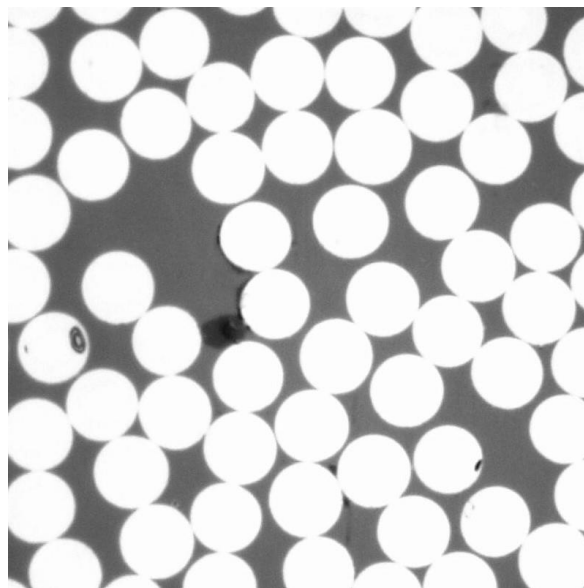


Figura 7-99. Poro en la 25B.

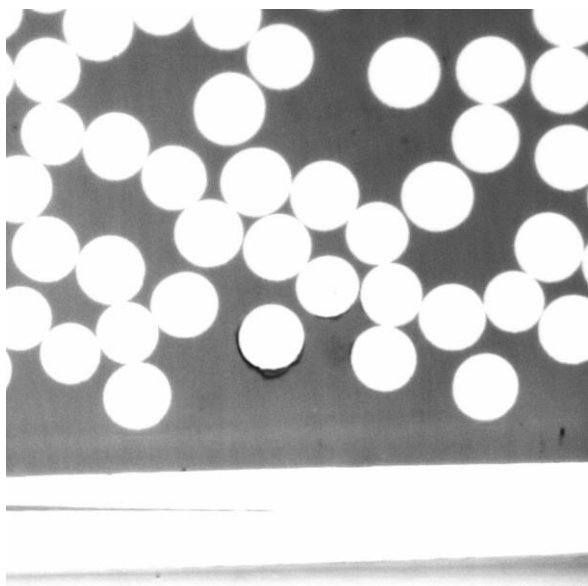


Figura 7-100. Despegues en la 25B.

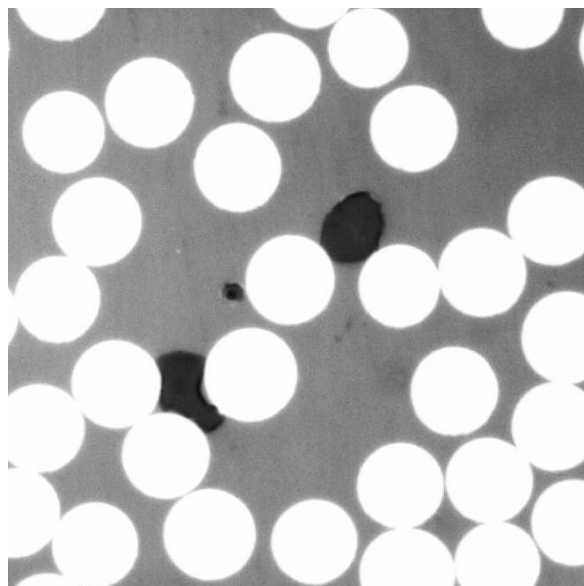


Figura 7-101. Poro en la 25B.

### 7.2.2 Probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura

Realizadas las comparaciones del daño en la sección de las láminas a 90° respecto a la dirección de aplicación de la carga en las muestras ensayadas al 90% de la carga de rotura experimental, se realiza el mismo procedimiento para las muestras ensayadas al 80%. Se procederá de igual modo que en el apartado anterior, comenzando por el daño experimentado alrededor de las grietas transversales y a continuación se ampliará el estudio al resto de la sección.

No se puede perder de vista el hecho de que al 80% de carga se ensayaron 5 muestras frente a la única muestra ensayada al 90%, luego la sección explorada es mucho mayor y por tanto, los resultados más fiables. Además, todas las muestras han sido sometidas a más de una secuencia de pulido, no coincidiendo el número de pulidos a los que se ha sometido a las muestras del panel A con el número de pulidos al que se ha sometido a las muestras del panel B. Esto se debe a que al ser el panel B más grueso, con un mayor número de láminas en su parte central, al cortar los trozos para la inspección de tamaño tan cercano al del diámetro del borde de embutición resulta muy difícil que las fotocomposiciones quedaran bien, ya que en el borde exterior de la cápsula donde se embuten

las muestras es más complicado obtener buenos resultados, pues la máquina de lijado y pulido aplica la fuerza en la zona central de la cápsula obteniéndose en esta zona resultados más uniformes. Para solucionar esto se decidió, en primera instancia, cortar las muestras en 4 trozos más pequeños en lugar de 3 y, viendo que esto no era suficiente, en las últimas muestras obtenidas se acortó aún más el tamaño de cada uno de los trozos. Una vez aclarado esto se pasa a analizar el daño en la sección de las láminas a  $90^\circ$ , dejando el estudio del efecto del pulido para la sección 7.3.

En primer lugar, al igual que en el apartado correspondiente al 90% de carga, se analiza la tendencia seguida por las grietas al aproximarse a la interfaz entre las láminas a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$ , es decir, si esta llega de forma continua o se bifurca en varios segmentos de grieta.

En el panel A, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_2]_5$ , se observa que la tendencia general de las grietas en las cercanías a la lámina a  $0^\circ$  es continua y recta, como las observadas al 90%. Sin embargo se aprecian en estas muestras un mayor número de bifurcaciones y se observan casos de grietas que se bifurcan en dos o más ramas alcanzándose distancias máximas entre ellas de unos 4 diámetros de fibra. Tal y como se ha dicho, estos casos se presentan en mucha menor proporción por lo que la variación en las observaciones realizadas puede tener su origen en el hecho de que ahora se estén analizando un área 5 veces mayor que en el caso anterior. En las Figuras 7-102, 7-103, 7-105 y 7-106 se ven ejemplos de grietas que acababan de forma continua en el panel A, mientras que las figuras 7-104 y 7-107 representan grietas que se bifurcan.

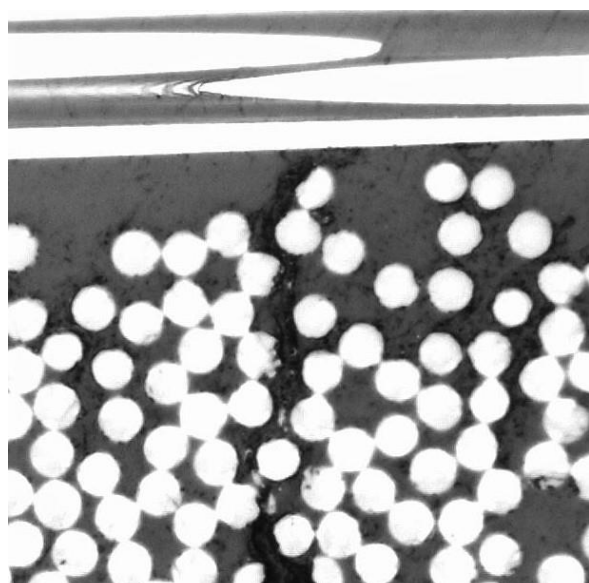


Figura 7-102. Terminación de grieta en la 7A.

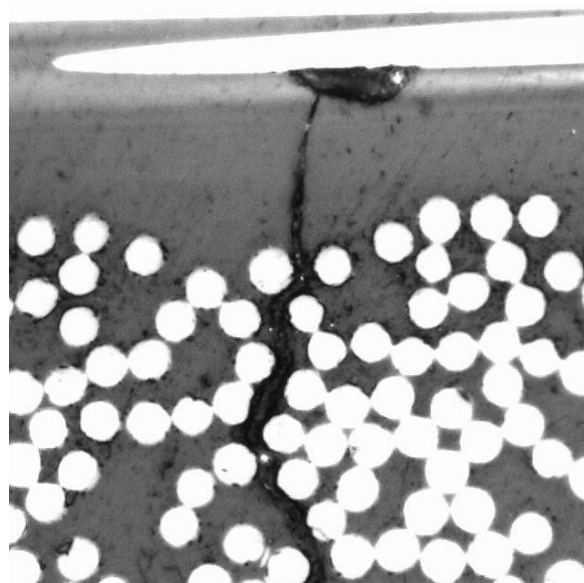


Figura 7-103. Terminación de grieta en la 7A.

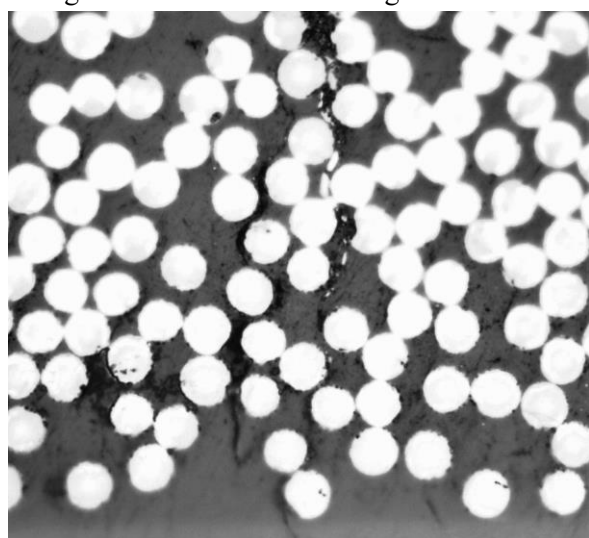


Figura 7-104. Terminación de grieta en la 7A.

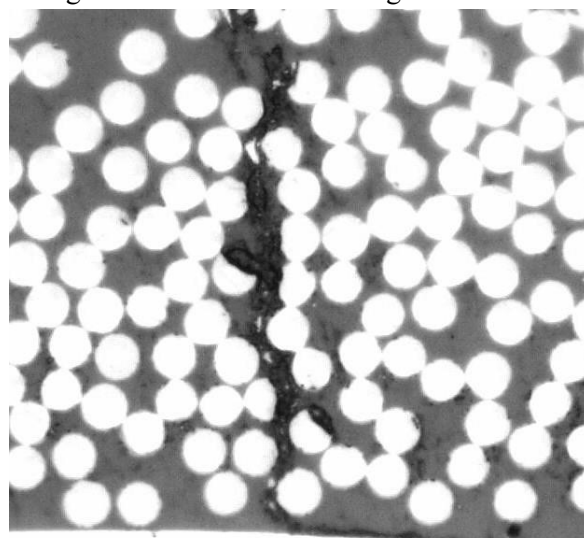


Figura 7-105. Terminación de grieta en la 9A.

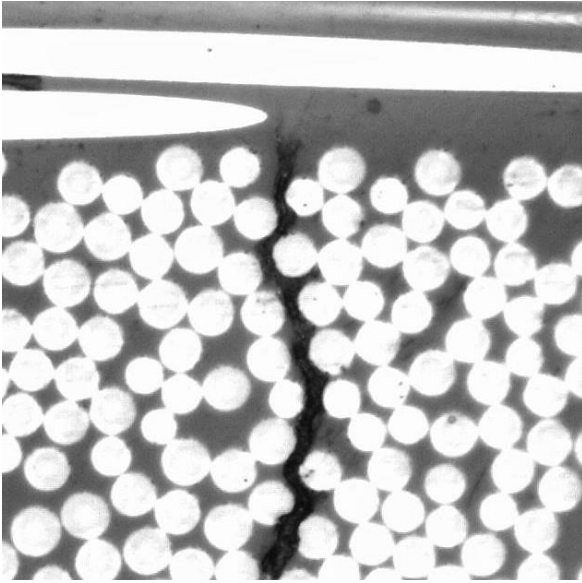


Figura 7-106. Terminación de grieta en la 10A.

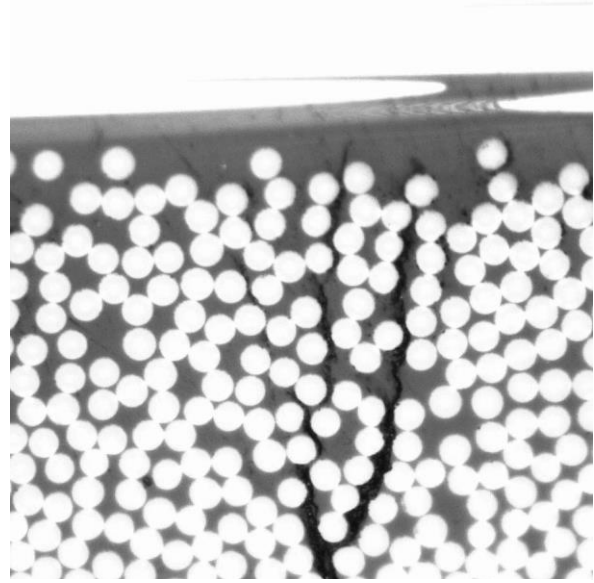


Figura 7-107. Terminación de grieta en la 10A.

Las observaciones realizadas en el panel B,  $[0_2, 90_4]_5$ , siguen en la misma línea que lo visto al 90% de carga: las grietas pueden terminar de forma continua o bifurcándose, manteniéndose este tipo de terminaciones superior en este laminado que en el A y alcanzándose distancias superiores entre dos ramas de bifurcación, siendo estas de hasta 13 diámetros de fibra. En las Figura 7-108 se observa una grieta que termina de forma continua en el panel B, mientras que las figuras 7-109 a 7-113 representan grietas que se bifurcan. La Figura 7-111 representa la bifurcación donde se ha apreciado distancia máxima entre dos de sus ramas y la 7-113 y la 7-113 la bifurcación cuyo origen se ha producido más lejos de la lámina a  $0^\circ$  de todas las observadas.

Por último, para acabar con el análisis del daño en la zona adyacente a las láminas a  $0^\circ$  se muestran dos micrografías de zonas donde aparecen una serie de despegues aislados de forma consecutiva que crecen avanzando sobre la matriz, tal y como ocurría en la muestra observada al 90%. Este tipo de defecto ha vuelto a encontrarse únicamente en el panel grueso. Las Figuras 7-114 y 7-115 representan dos ejemplos de este tipo de defecto.

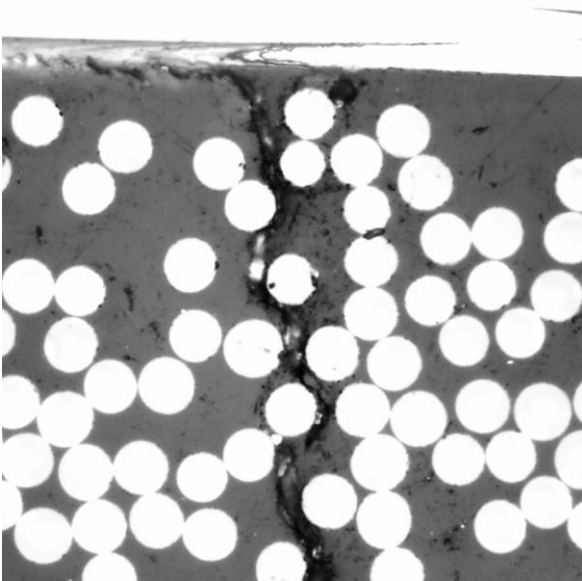


Figura 7-108. Terminación de grieta en la 6B.

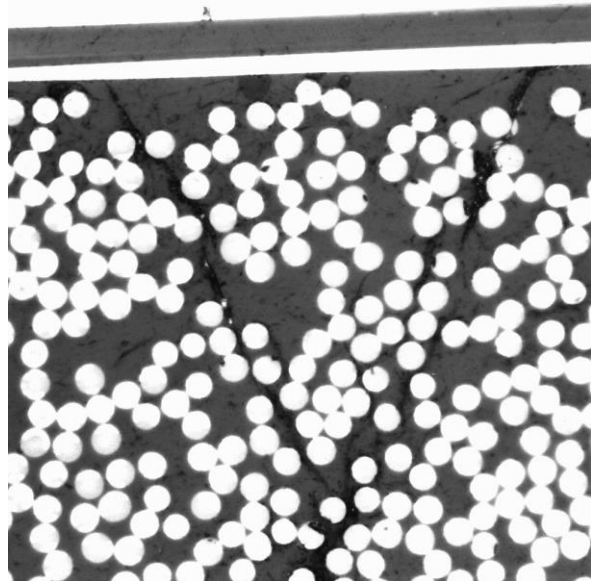


Figura 7-109. Terminación de grieta en la 6B.



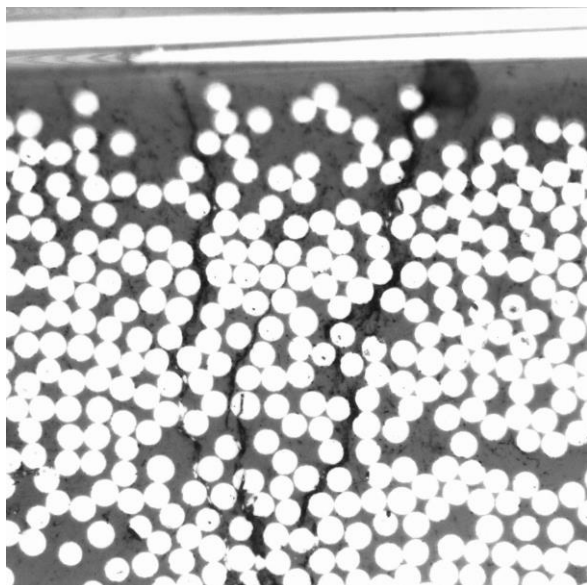


Figura 7-110. Terminación de grieta en la 6B.

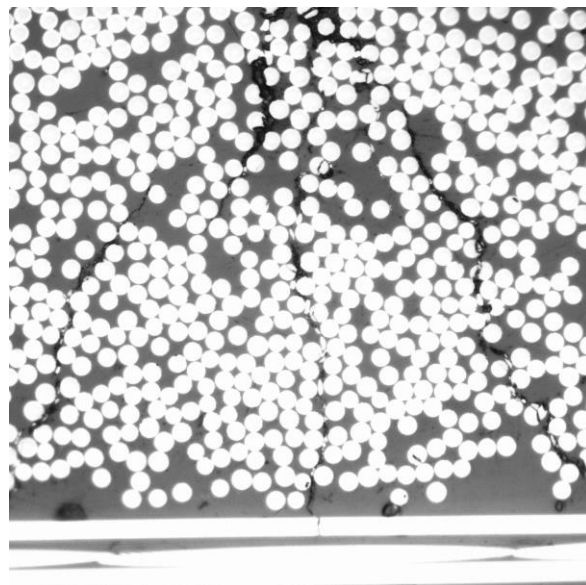


Figura 7-111. Terminación de grieta en la 6B.

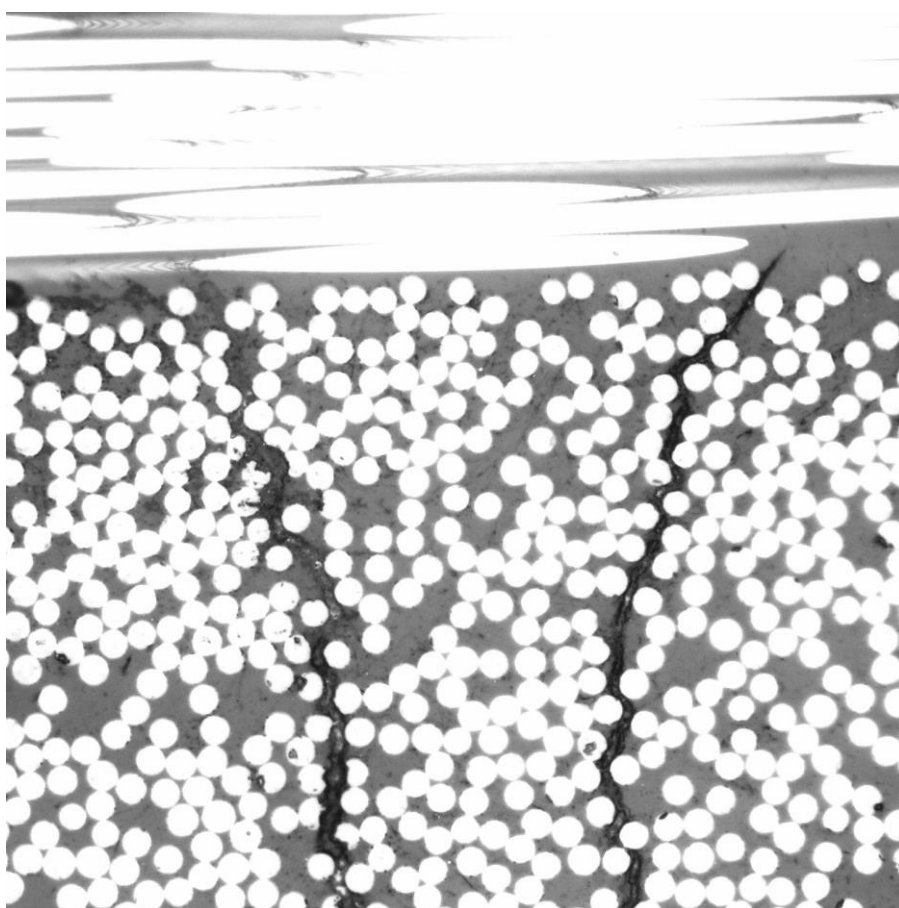


Figura 7-112. Terminación de grieta en la 8B

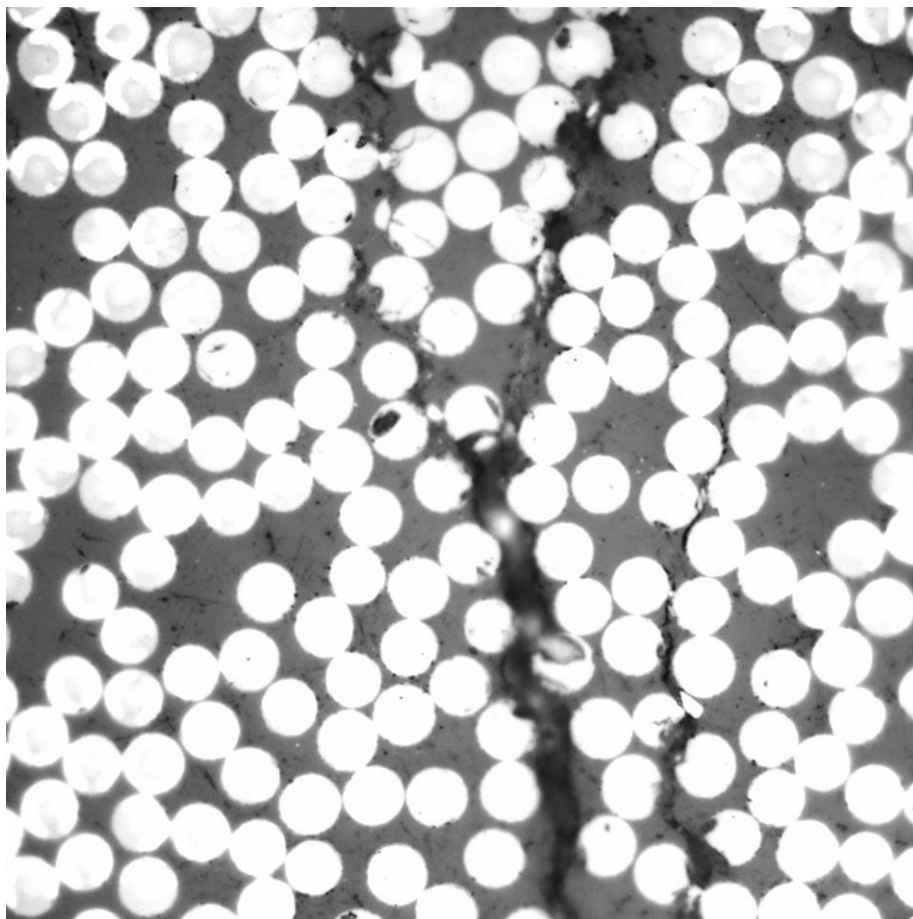


Figura 7-113. Terminación de grieta en la 8B.

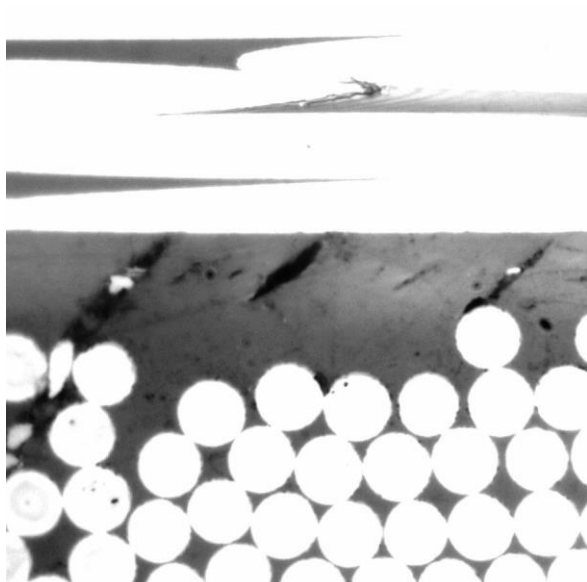


Figura 7-114. Despegues en la 7B.

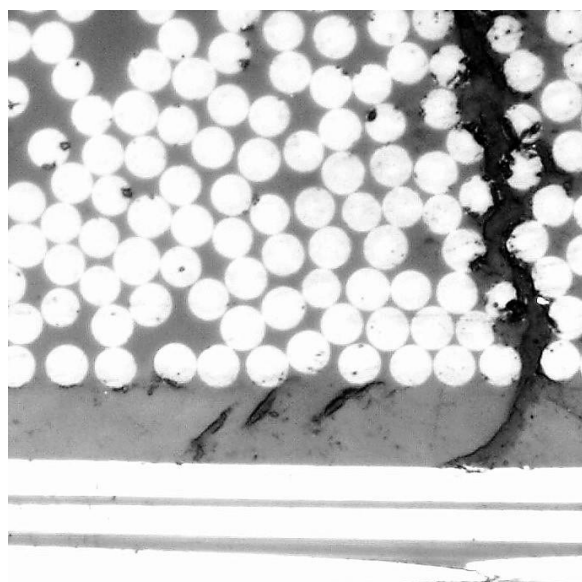


Figura 7-115. Despegues en la 7B.

Se puede concluir por tanto que, al igual que ocurría al 90% de su carga de rotura, a parte de un mayor número de delaminaciones existe cerca de las láminas a  $0^\circ$  una mayor tendencia de la grieta a abrirse y por tanto un mayor daño en la matriz en inmediaciones de la grieta transversal.



Una vez analizada la zona cercana a las láminas a  $0^\circ$  se pasa a exponer lo observado en la zona central. El estudio del daño sufrido por las muestras se ha realizado de igual modo que en el anterior apartado, es decir, desde defectos de pequeño tamaño como despegues aislados hasta bifurcaciones de la grieta como las observadas en las cercanías de la lámina a  $0^\circ$ .

En primer lugar, se comparan las zonas donde se aprecian despegues en la muestra de cada panel, comenzando por los despegues aislados que se aprecian alrededor de una macrogrieta.

En el panel A,  $[0_2, 90_2]_5$ , se observan tanto despegues muy cercanos a la macrogrieta, a distancias de un diámetro de fibra, tal y como sucede con la muestra ensayada al 90%, como despegues a una distancia intermedia de unos 3 diámetros de fibra, que se producen de manera aislada sin estar rodeados de despegues vecinos como se observaba en la muestra del panel B ensayada al 90%. Las Figuras 7-116 a 7-119 representan ejemplos de despegues hallados en las probetas del panel A ensayadas al 80%.

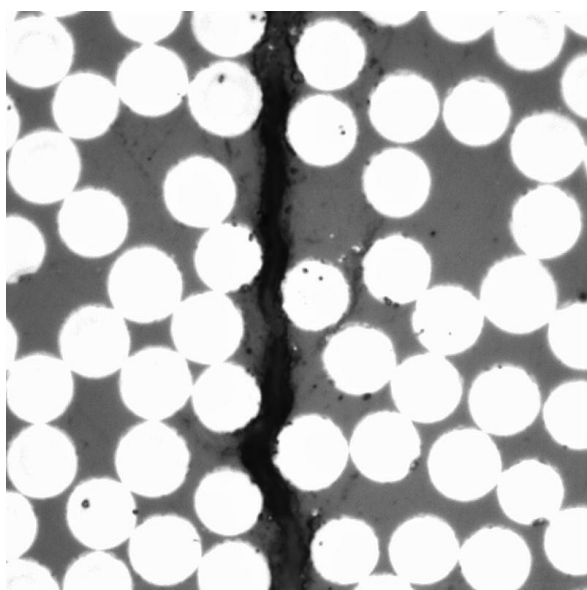


Figura 7-116. Despegue en la 6A.

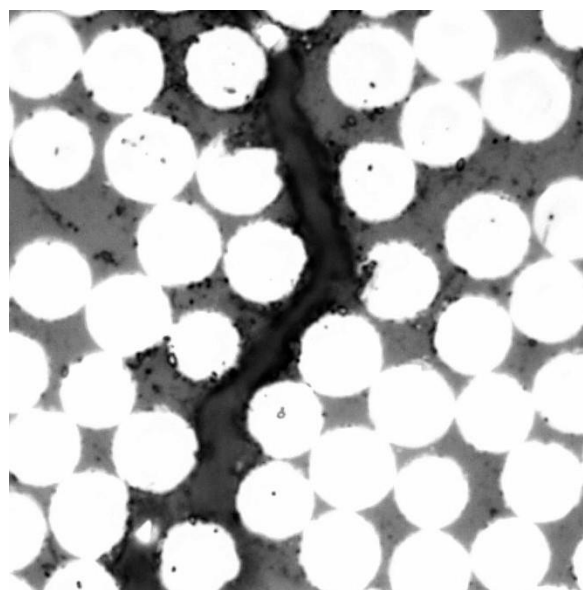


Figura 7-117. Despegue en la 6A.

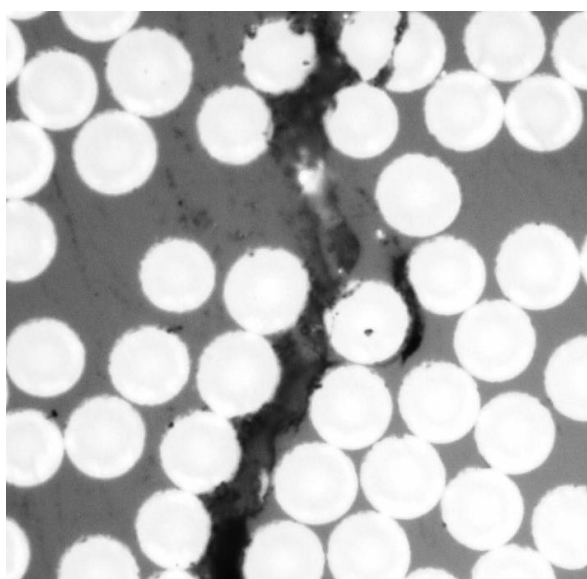


Figura 7-118. Despegue en la 7A.

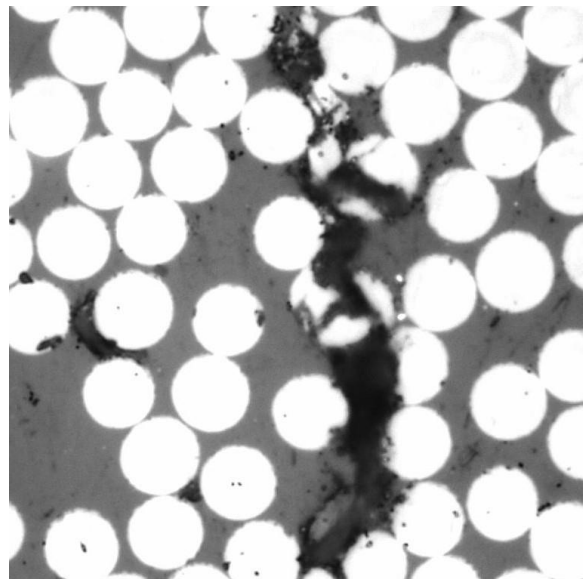


Figura 7-119. Despegue en la 10A.

En el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , tal y como se muestra en las ilustraciones 7-120 a 7-121 se aprecian despegues a distancias de 1, 2, 3 y 4 diámetros de fibra, presentándose tanto aislados como extendidos hacia la matriz y acompañados de despegues en las fibras vecinas.

Por tanto, en el rastreo realizado para las muestras ensayadas al 80% de la tensión de rotura no se encuentran diferencias apreciables a nivel de despegues aislados alrededor de la macrogrieta.

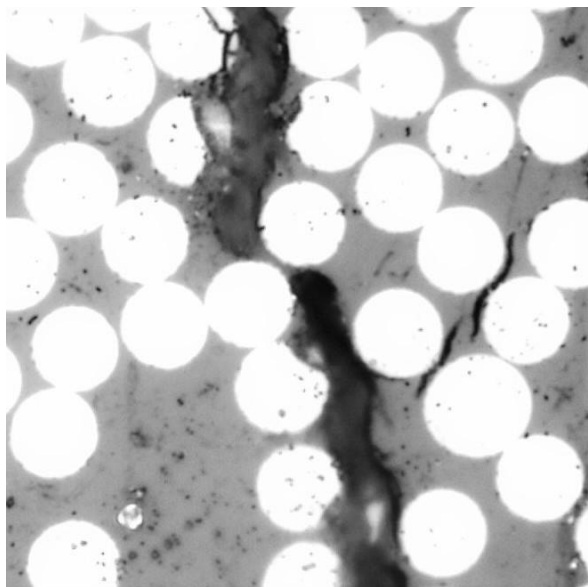


Figura 7-120. Despegue en la 7A.

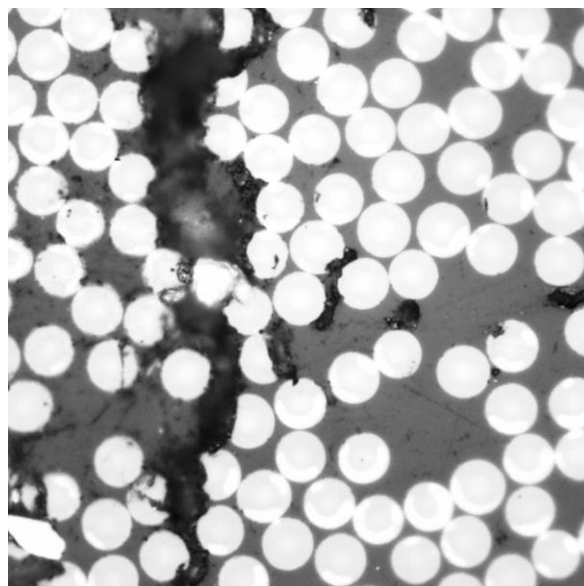


Figura 7-121. Despegue en la 7B.

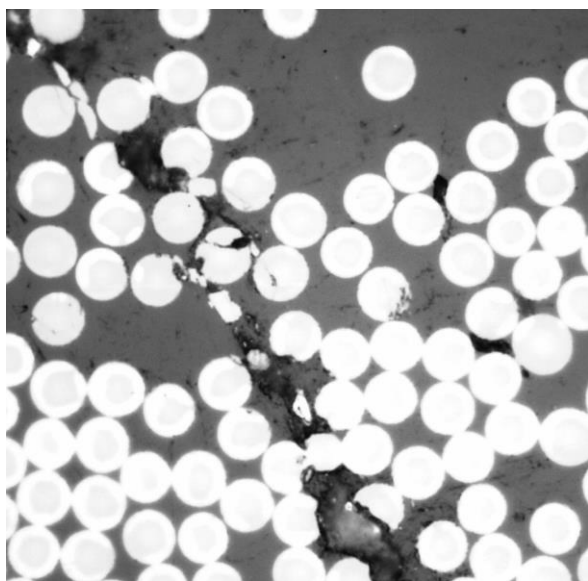


Figura 7-122. Despegues en la 7B.

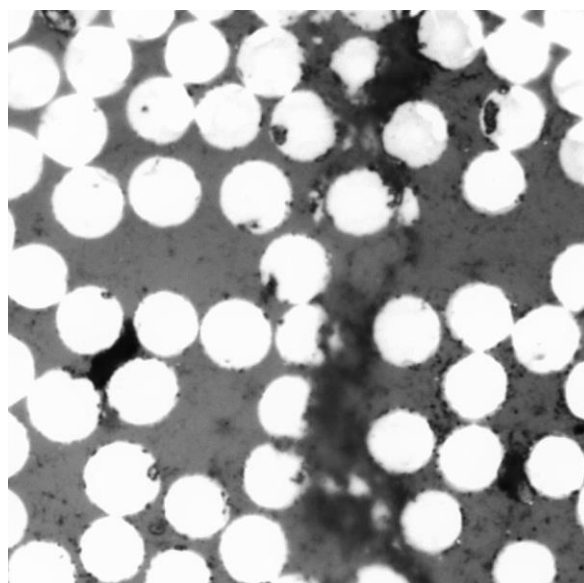


Figura 7-123. Despegues en la 8B.

El siguiente paso a seguir será la observación de microgrietas, es decir, daño que aparece bordeando no ya una sola fibra, si no una serie de fibras consecutivas y rompiendo la matriz, alrededor de las macrogrietas. Las Figuras 7-124 a 7-129 representan micrografías de este tipo de defecto en la muestra ensayada al 80 % de carga. Para el panel A se observa que las distancias alcanzadas para este tipo de defecto respecto a la macrogrieta son de hasta 7 diámetros de fibra respecto a la macrogrieta, observándose esta máxima distancia en la Figura 7-125.

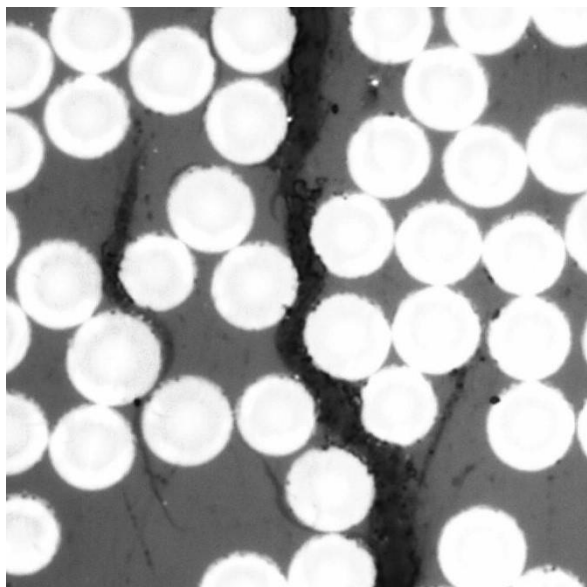


Figura 7-124. Microgrieta en la 6A.

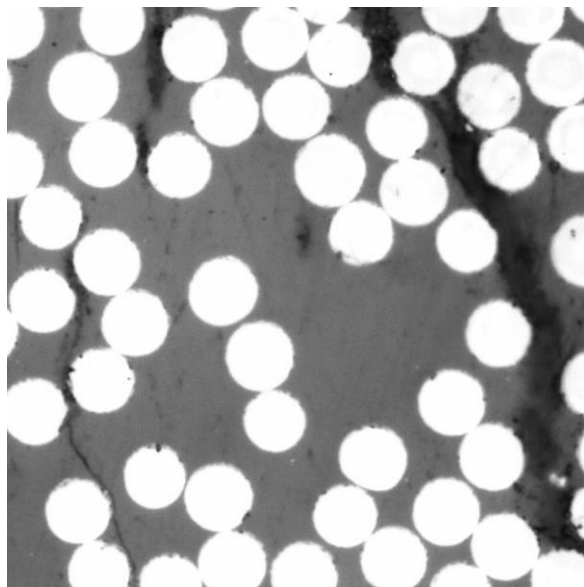


Figura 7-125. Microgrieta en la 6A.

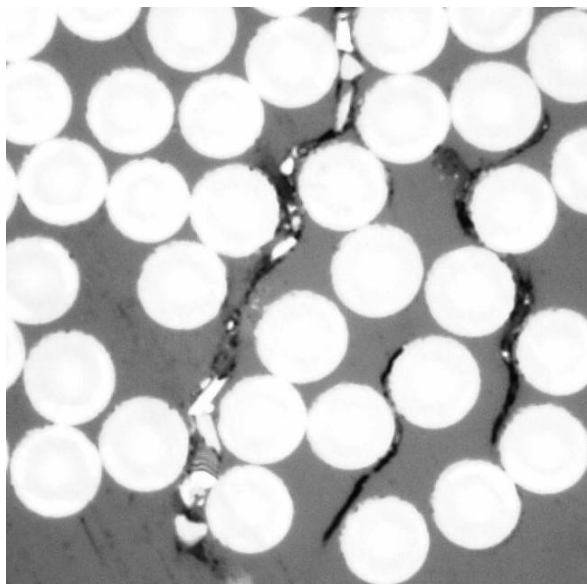


Figura 7-126. Microgrieta en la 7A.

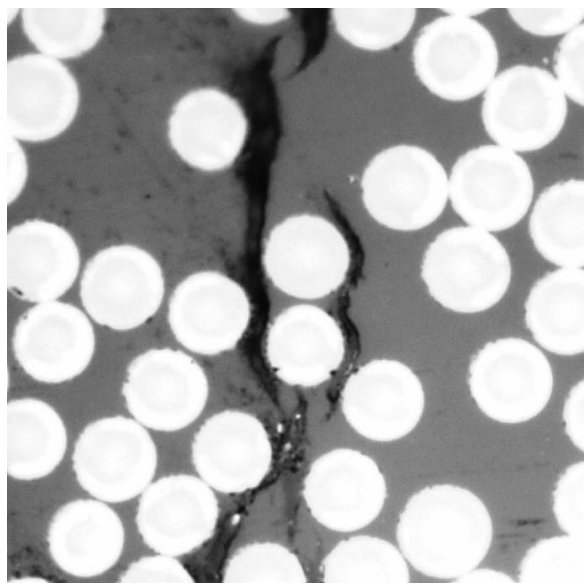


Figura 7-127. Microgrieta en la 7A.

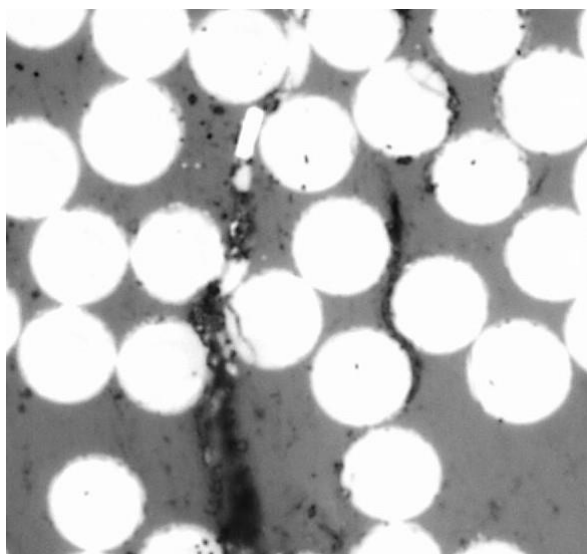


Figura 7-128. Microgrieta en la 10A.

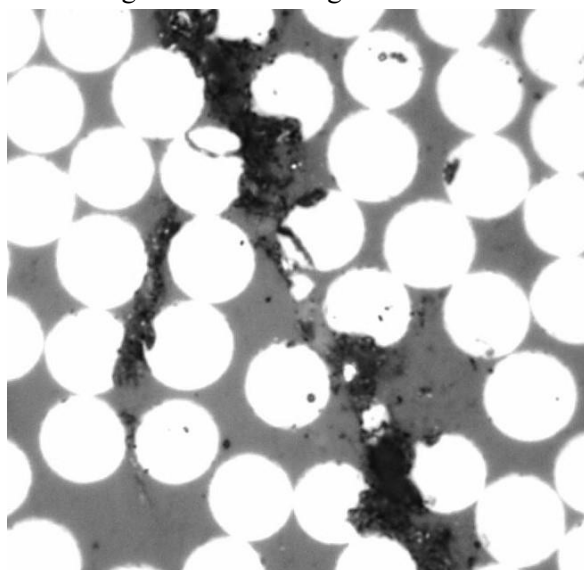


Figura 7-129. Microgrieta en la 10A.

En el panel B, se observa que aunque en el laminado A este tipo de defecto alcanza distancias importantes respecto de la macrogrietas siguen siendo mayores en el panel B. Sin embargo la diferencia ya no es tan acusada, siendo las distancias máximas alcanzadas en las muestras del laminado grueso de unos 9 diámetros de fibra respecto a los 7 de las muestras del laminado delgado. Las Figuras 7-130 a 7-135 representan ejemplos de microgrietas encontradas en las muestras del panel B ensayadas al 80% de carga.

Se puede concluir por tanto, del análisis de este tipo de daño que aunque, al igual que al 90% de la carga las microgrietas del panel B alcanzan una mayor distancia respecto a la macrogrieta estas diferencias se vuelven menos acusadas al 80% de carga. Se aprecia también para este nivel de carga que se mantiene la mayor tendencia en el panel B de la microgrieta a desviarse en su recorrido de un camino más o menos paralelo a la macrogrieta a través de las fibras.

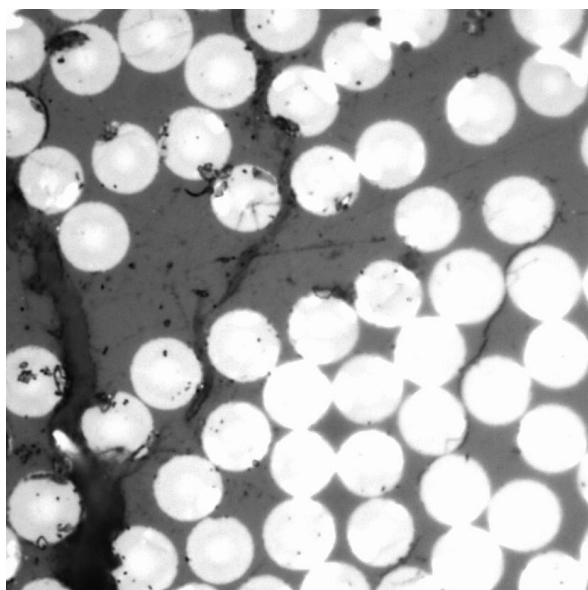


Figura 7-130. Microgrieta en la 6B.

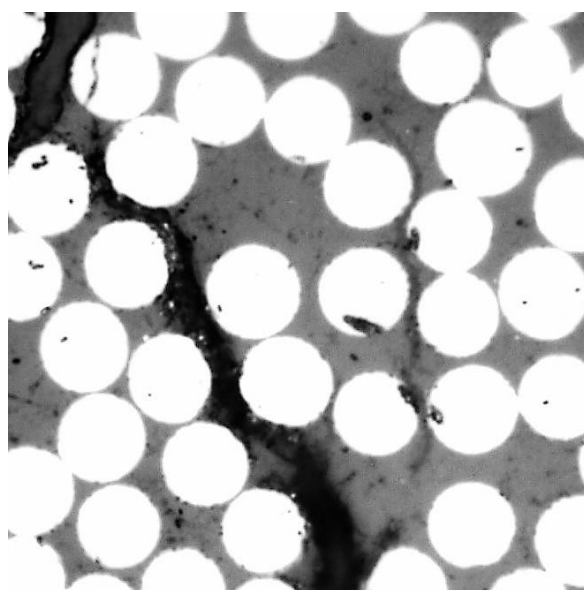


Figura 7-131. Microgrieta en la 6B.

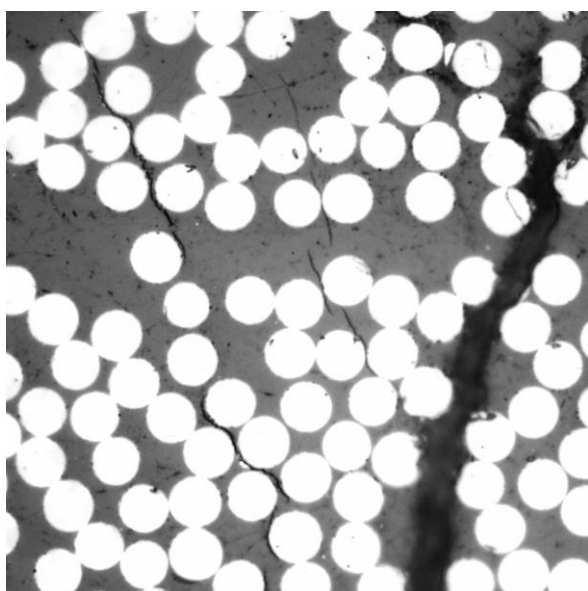


Figura 7-132. Microgrieta en la 6B.

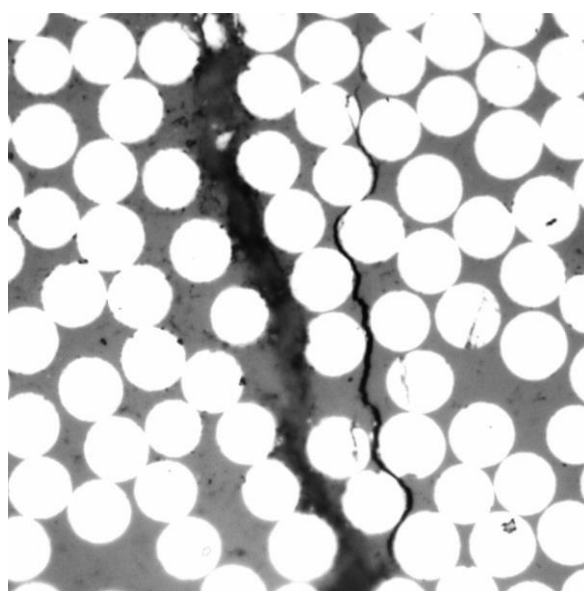


Figura 7-133. Microgrieta en la 6B.

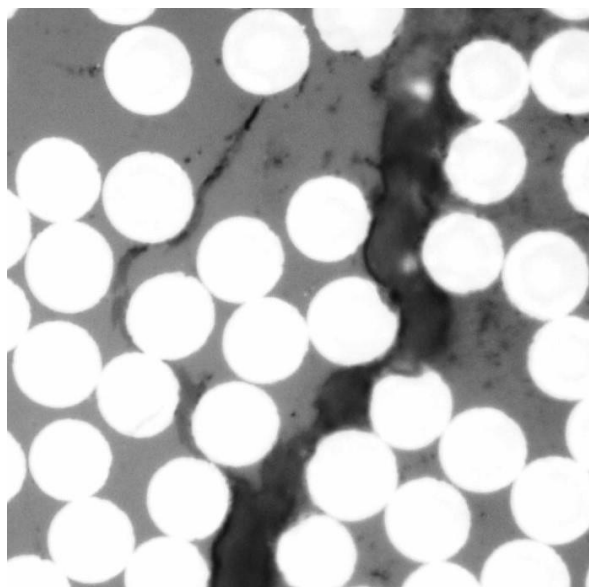


Figura 7-134. Microgrieta en la 7B.

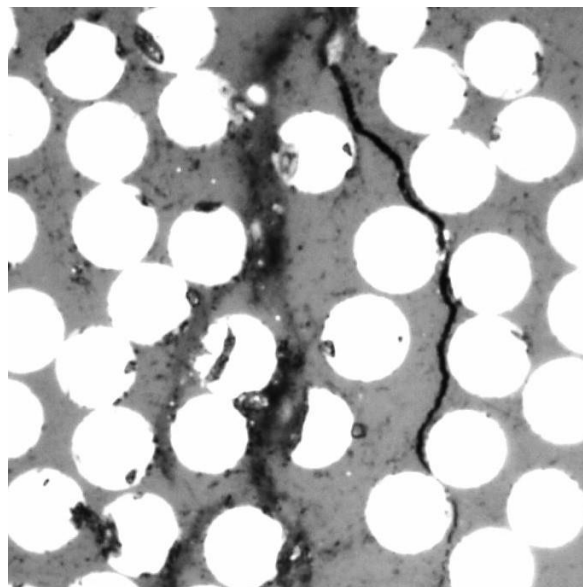


Figura 7-135. Microgrieta en la 8B.

Una vez estudiado como discurren lo que se han denominado como microgrietas (grietas que transcurren a través de un pequeño número de fibras) se estudia de forma cualitativa las distintas formas que presentan las macrogrietas en cada uno de los paneles.

En el panel A, tal y como sucedía en la muestra ensayada al 90%, la mayor parte de las grietas siguen una tendencia continua (Figura 7-136), sin bifurcarse ni apreciarse mayor daño a su alrededor que los despegues o microgrietas ya comentados. Sin embargo, al igual que sucedía con las microgrietas, se observan para el 80% un mayor número de grietas que se bifurcan en cada muestra. Sin embargo, las distancias máximas encontradas entre dos ramas de una bifurcación es de unos 5 diámetros de fibra, lo que está dentro de lo observado en la muestra al 90%. En las Figuras 7-137 a 7-139 aparecen ejemplos de este tipo de defecto en las muestras del panel A.

Pasando ahora al análisis del defecto nombrado como grietas discontinuas se observa que entre dos fragmentos de grieta discontinua la máxima distancia encontrada es de 8 diámetros de fibra, mayor que lo visto en la aparición de microgrietas alrededor de una macrogrieta. Las Figuras 7-142 y 7-143 representan, visionándolas conjuntamente, la grieta discontinua en la que mayor distancia se ha encontrado entre dos fragmentos en el panel A.

En las Figuras 7-144 a 7-154 se muestran una serie de ejemplos de grietas, continuas, que se bifurcan y grietas incompletas pertenecientes al panel B.

En el barrido de las muestras completas se ha observado, por tanto, que aunque la tendencia de las grietas del panel A a bifurcarse ha aumentado con respecto a lo observado al 90% de la carga de rotura, esta sigue siendo mayor en el panel B. Es decir, a nivel de ramificación de la grieta el daño se mantiene superior en las muestras del panel B que en las del panel A. Las distancias máximas encontradas ahora entre dos ramas de una bifurcación es de unos 8 diámetros de fibra, lo que se mantiene por encima de lo observado en el panel A pero ya las diferencias no son tan acusadas. En cuanto a grietas incompletas se aprecian distancias máximas de hasta 18 diámetros de fibra respecto a la macrogrieta. Es decir, en el alcance de este tipo de defecto si que se aprecian diferencias considerables entre ambos paneles.

Se puede concluir del análisis realizado al daño alrededor de una macrogrieta, que aunque se aprecie una mayor apertura en la aparición de defectos que en la muestra ensayada al 90% para el panel A, el alcance de dichos defectos sigue sin alcanzar lo observado para el panel B, es decir, aunque para este porcentaje de carga también se aprecie un mayor número de grietas en el panel A que en el panel B el daño alrededor de éstas se extiende más en el B que en el A.

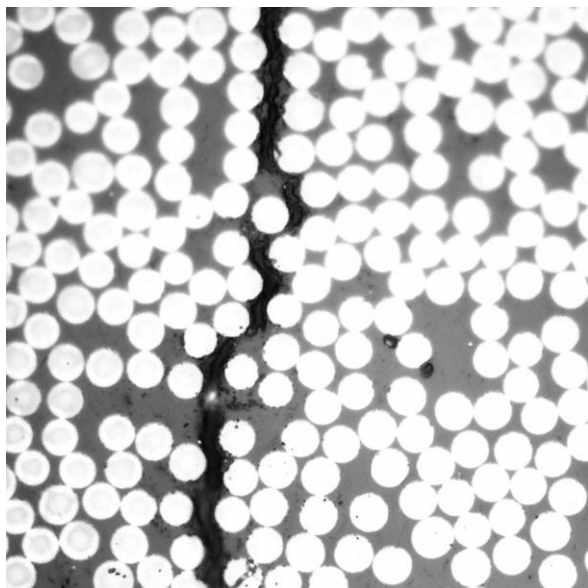


Figura 7-136. Grieta continua en la 6A.

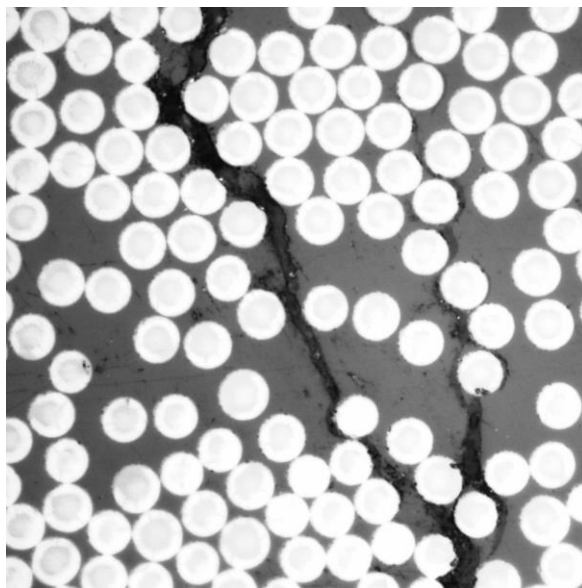


Figura 7-137. Bifurcación en la 7A.

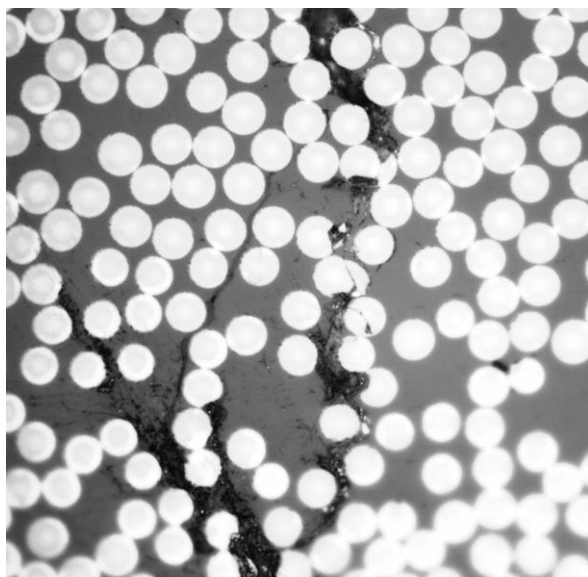


Figura 7-138. Bifurcación en la 7A.

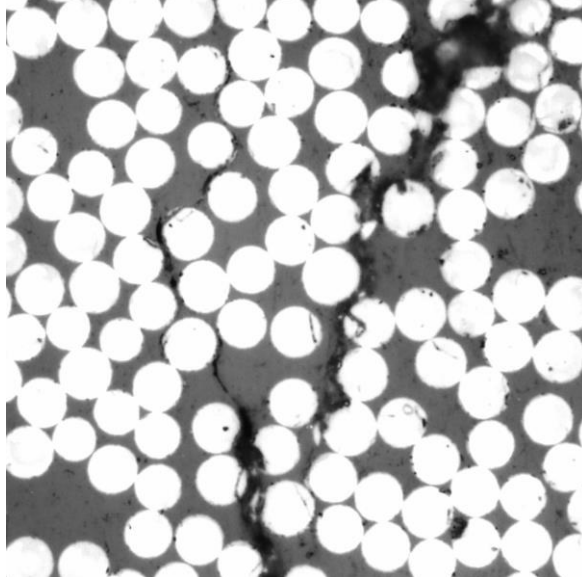


Figura 7-139. Bifurcación en la 10A.

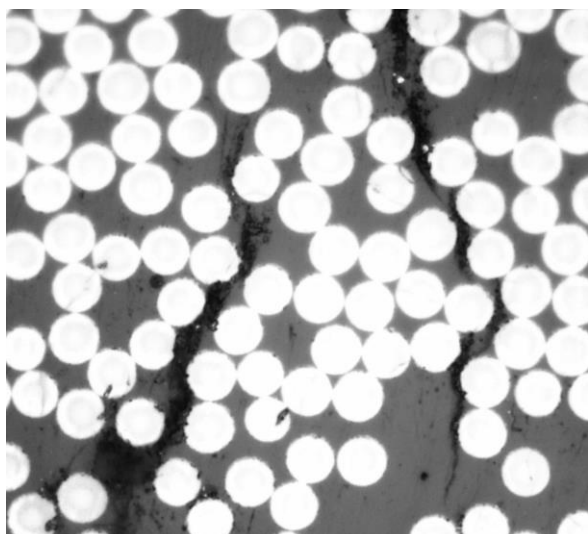


Figura 7-140. Grieta discontinua en la 6A.

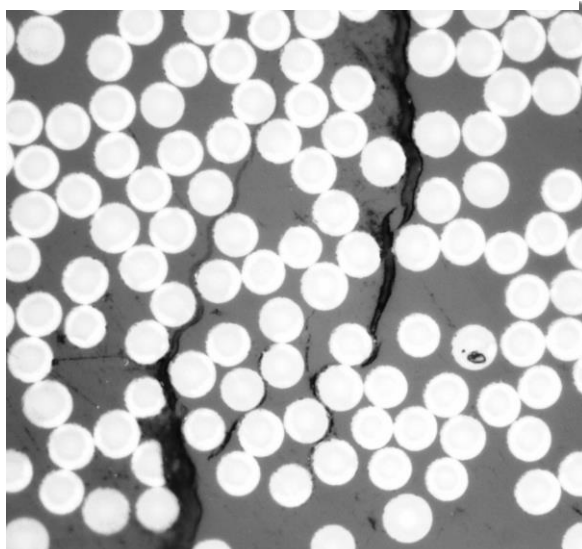


Figura 7-141. Grieta discontinua en la 7A.



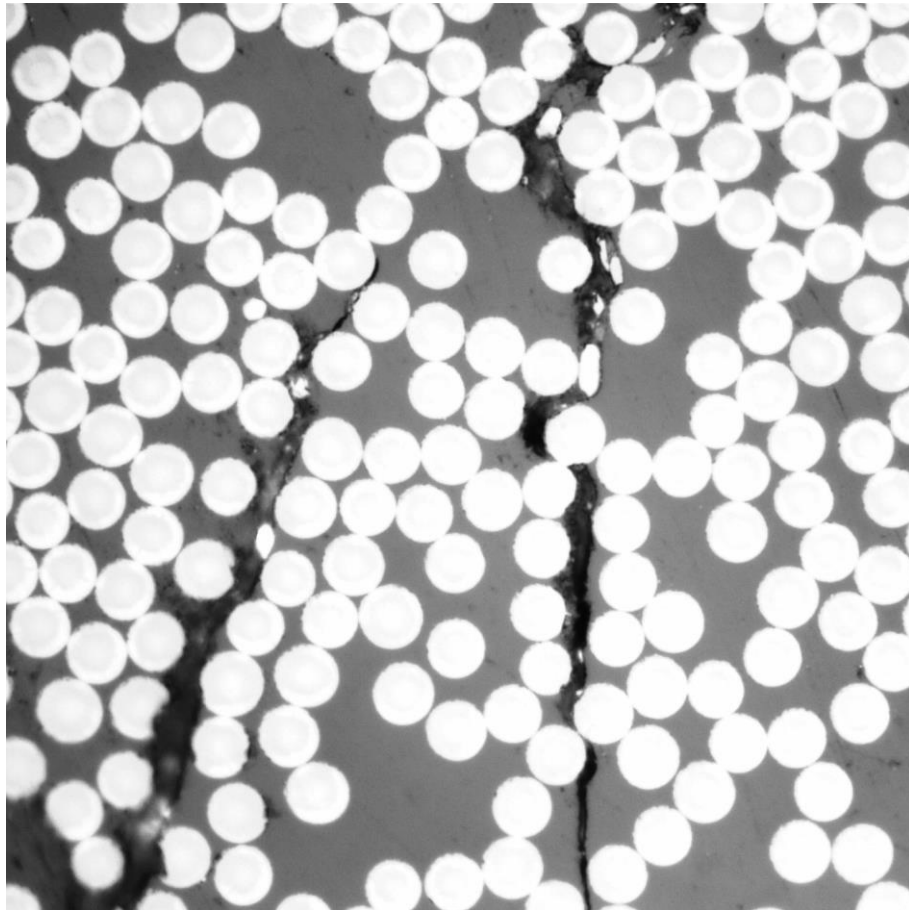


Figura 7-142. Grieta discontinua en la 7A.

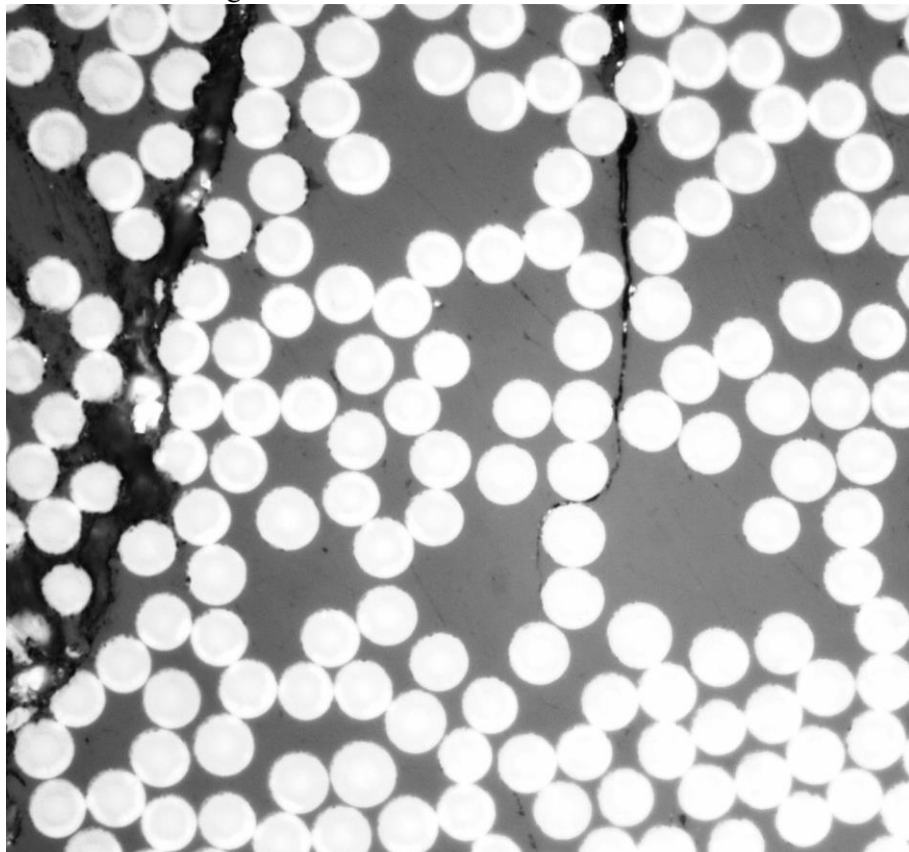


Figura 7-143. Grieta discontinua en la 7A.

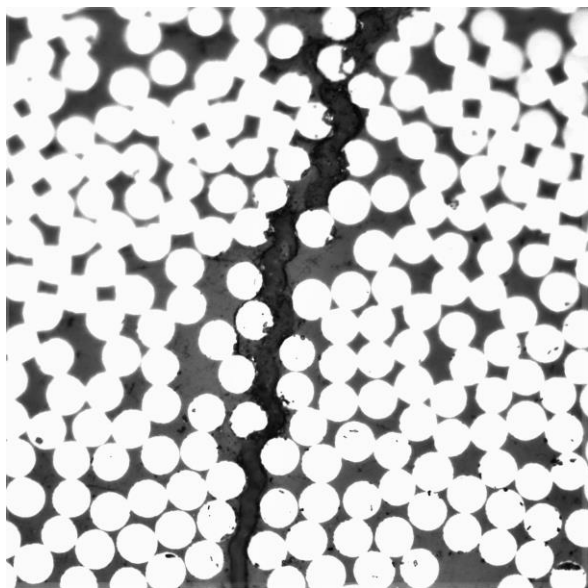


Figura 7-144. Grieta continua en la 6B.

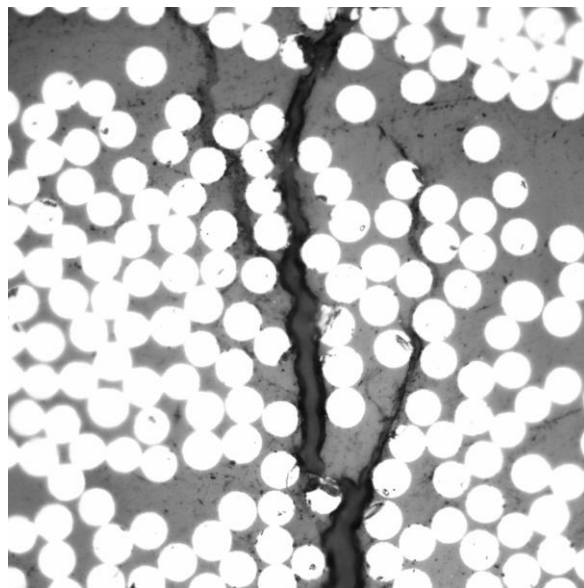


Figura 7-145. Bifurcación en la 6B.

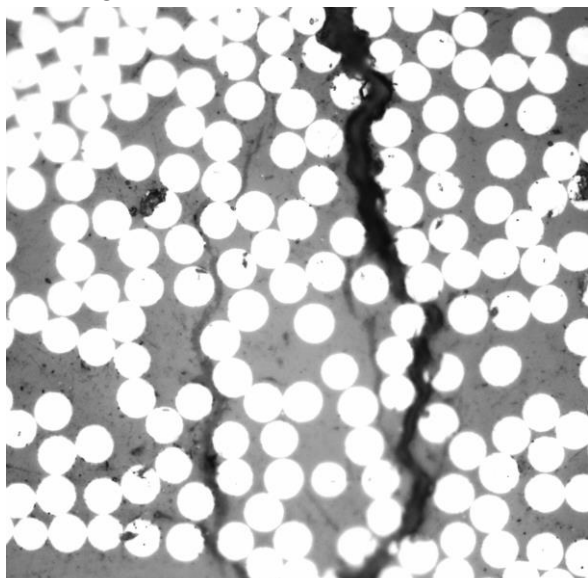


Figura 7-146. Bifurcación en la 6B.

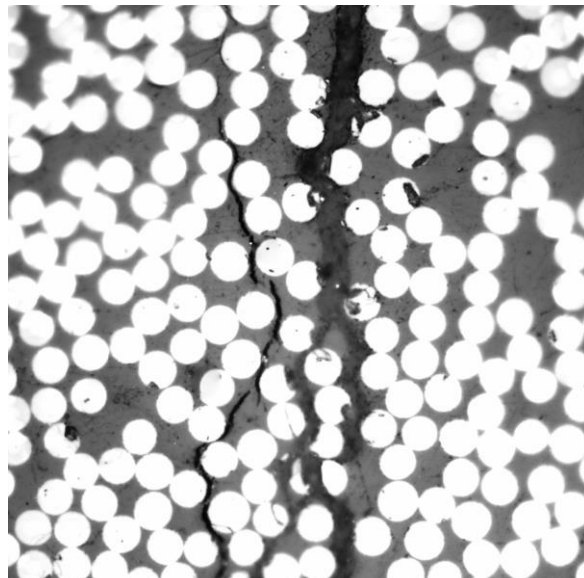


Figura 7-147. Bifurcación en la 7B.

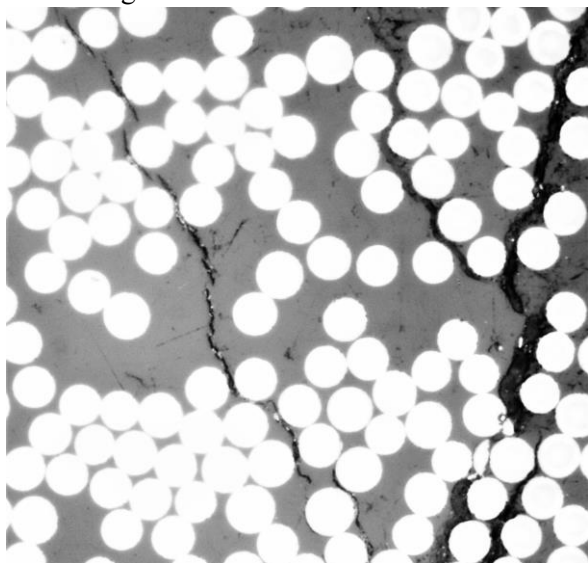


Figura 7-148. Bifurcación en la 7B.

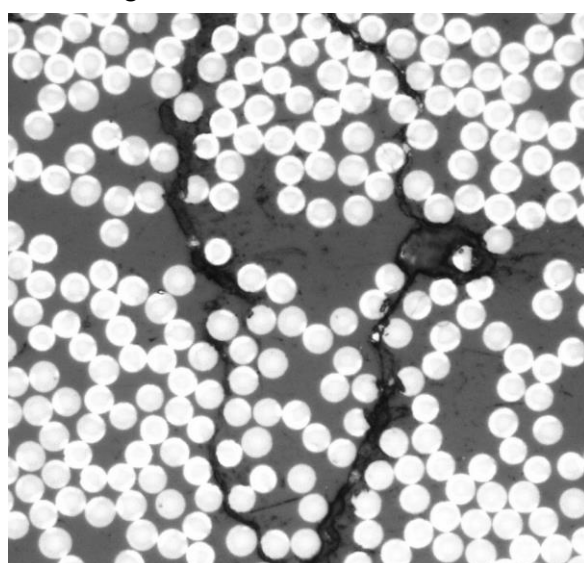


Figura 7-149. Bifurcación en la 7B.



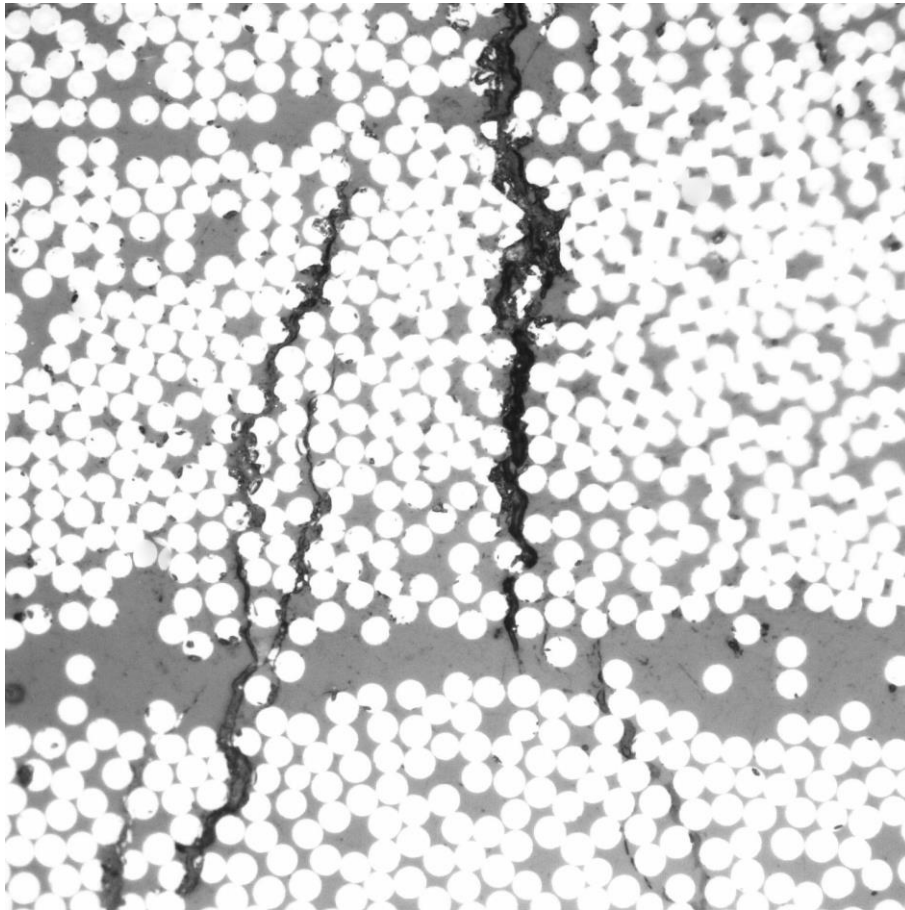


Figura 7-150. Grieta que no une en la 7B.

Para concluir el análisis realizado del daño en las macrogrietas se analiza la existencia de grietas en las que se ha producido la rotura de fibra. En este sentido, para el 80% de carga tampoco se han observado diferencias remarcables. Las Figuras 7-152 a 7-155 representan ejemplos de este defecto observados en ambos paneles.

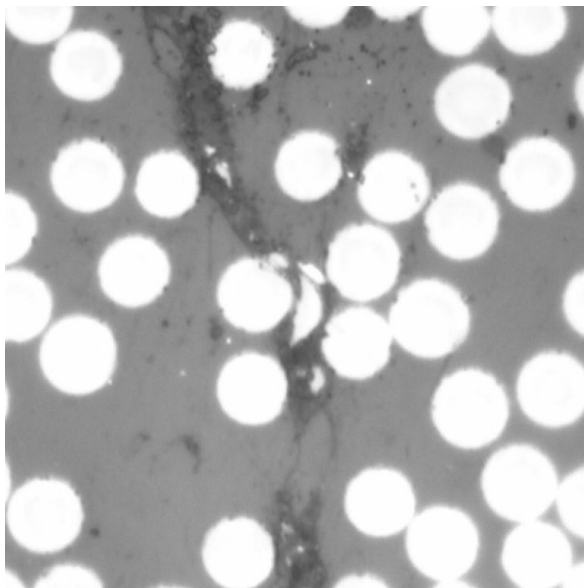


Figura 7-151. Rotura de fibra en la 6A.

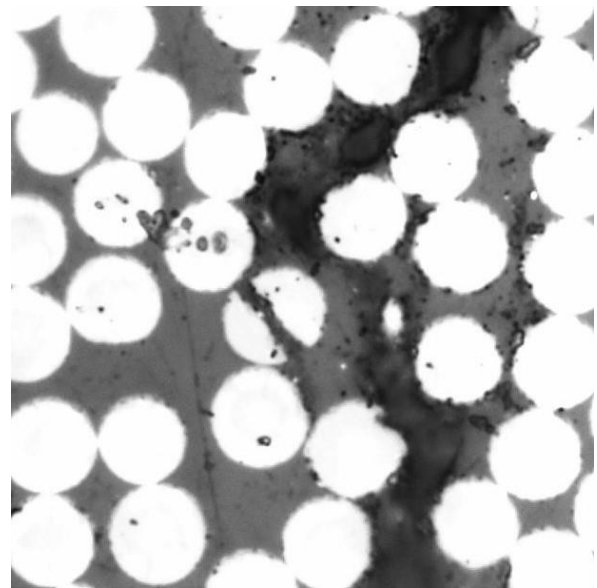


Figura 7-152. Rotura de fibra en la 6A.

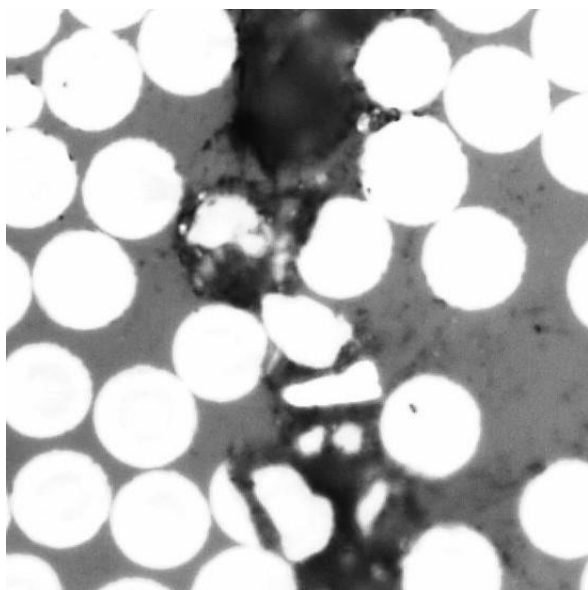


Figura 7-153. Rotura de fibra en la 7B.

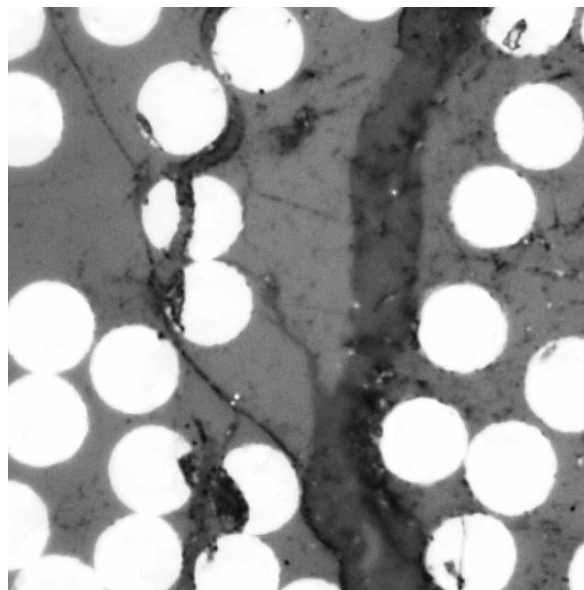


Figura 7-154. Rotura de fibra en la 7B.

Al igual que se hizo para el 90% de carga, se pasa analizar el resto de las secciones de las láminas a  $90^\circ$ . En primer lugar, se analiza el daño denominado como grieta incompleta. Como se ha comentado, este es un defecto que aparece en ambos paneles, presentándose para este porcentaje de la tensión aplicada en una densidad de 0.2 grietas discontinuas por unidad de centímetro en el panel A, frente a 0.939 grietas discontinuas por unidad de centímetro en el panel B. Es decir, respecto a este tipo de defecto se aprecia también un mayor daño en el panel B que en el panel A. Las Figuras 7-155 a 7-158 se corresponden con micrografías de este tipo de defecto en ambos paneles. Comentar que a pesar de que en las muestras analizadas al 90% de carga no se apreció ningún caso de grieta que no termine que no llegara a las cercanías de la lámina a  $0^\circ$ , en estas muestras si que se ha apreciado un caso de grieta que no termina, o microgrieta lejos de una macrogrieta, en la muestra 8B, tal y como se recoge en la Figura 158.

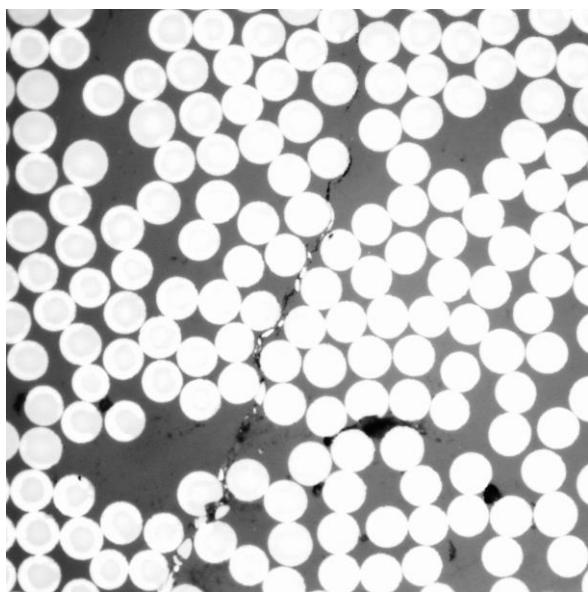


Figura 7-155. Grieta incompleta en la 7A.

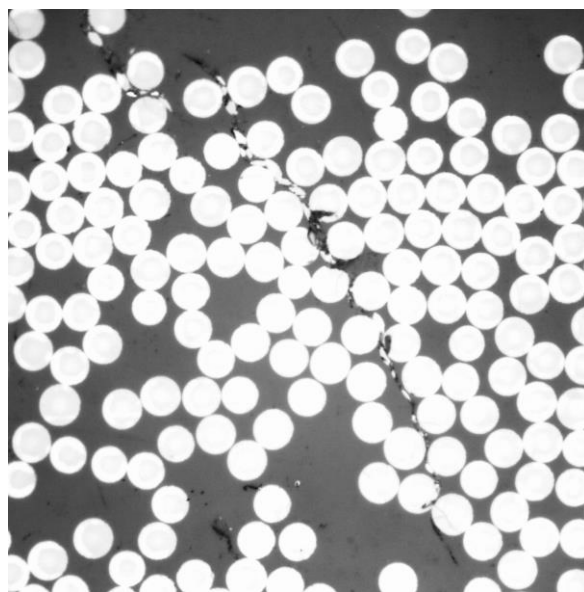


Figura 7-156. Grieta incompleta en la 8A.

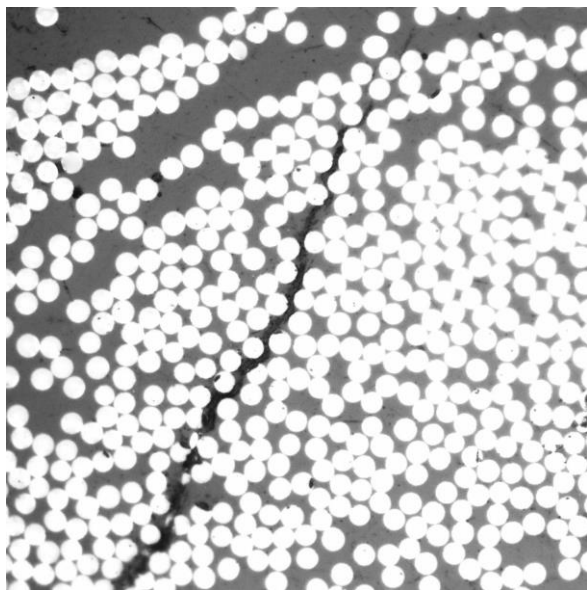


Figura 7-157. Grieta incompleta en la 6B.

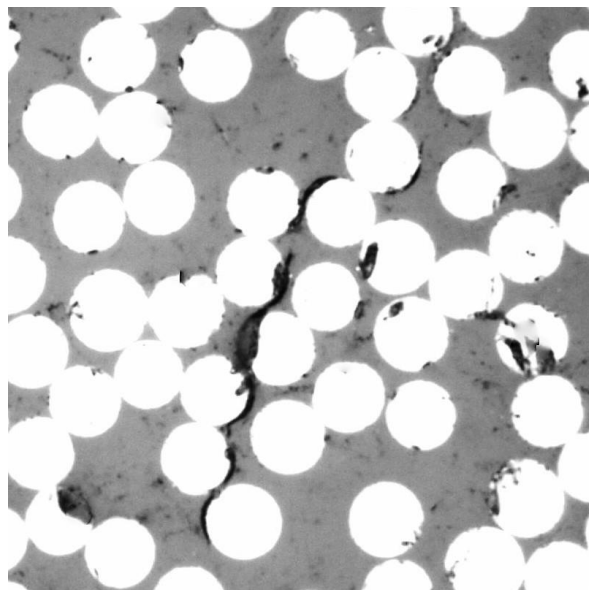


Figura 7-158. Grieta incompleta en la 8B.

En segundo lugar, se muestran figuras de defectos que se han encontrado en la sección a 90° para las muestras correspondientes a cada panel indistintamente, como despegues aislados o defectos con forma de porosidad que, bajo el nivel de análisis del presente proyecto, no son posibles de clasificar en función de si son consecuencia de la aplicación de carga o de defectos del material. Las Figuras 7-159 a 7-162 se corresponden con defectos encontrados en el panel A. Las Figuras 7-163 a 7-166 con defectos encontrados en el panel B.

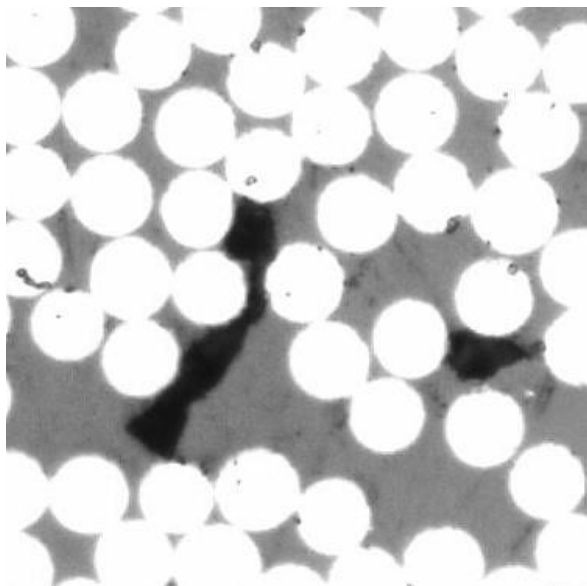


Figura 7-159. Poro en la 6A.

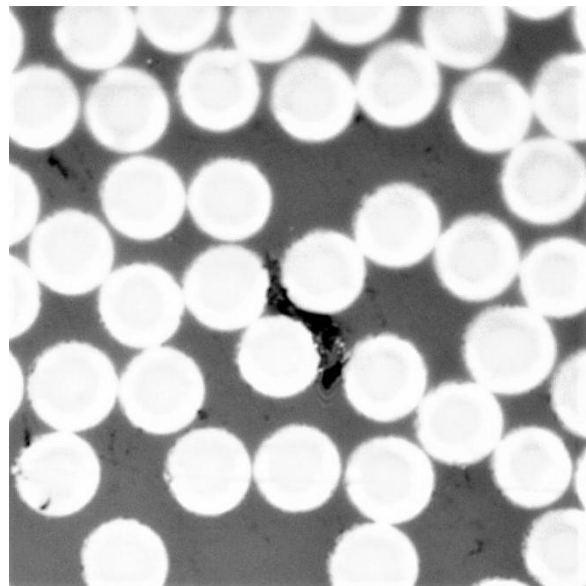


Figura 7-160. Poro en la 7A.

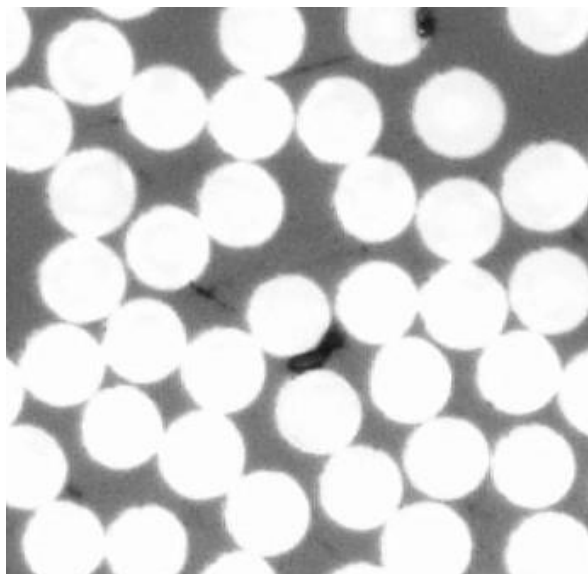


Figura 7-161. Poro en la 7A.

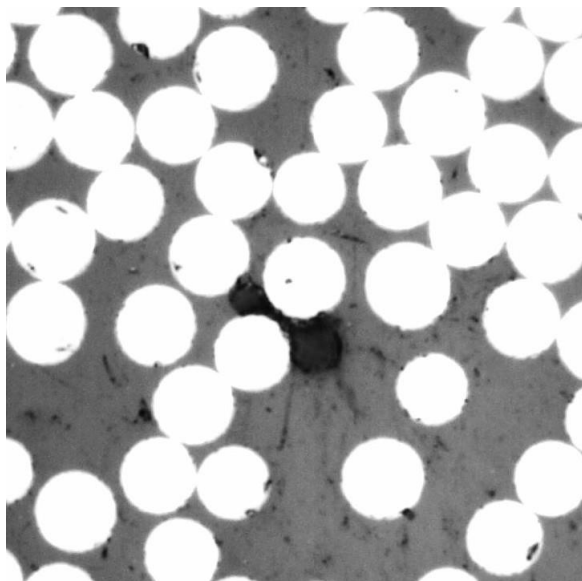


Figura 7-162. Poro en la 9A.

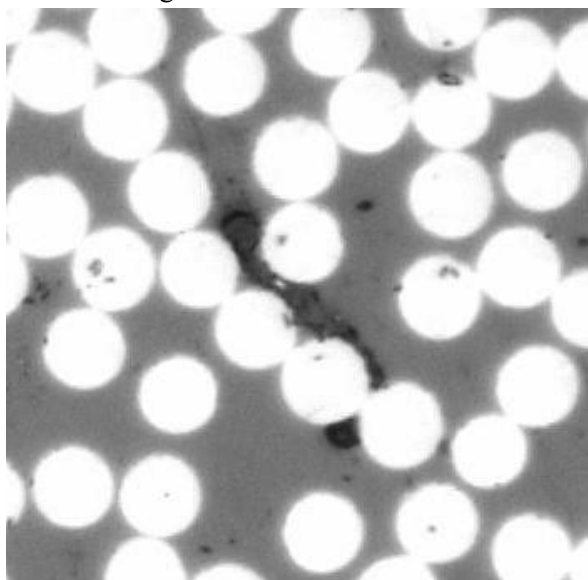


Figura 7-163. Poro en la 10A.

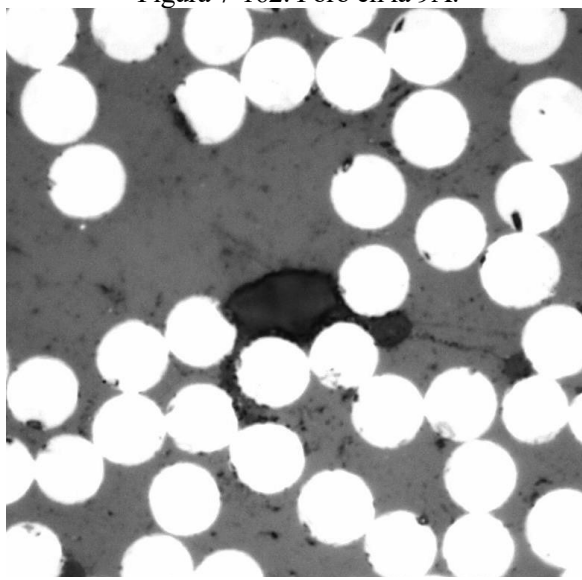


Figura 7-164. Poro en la 8B.

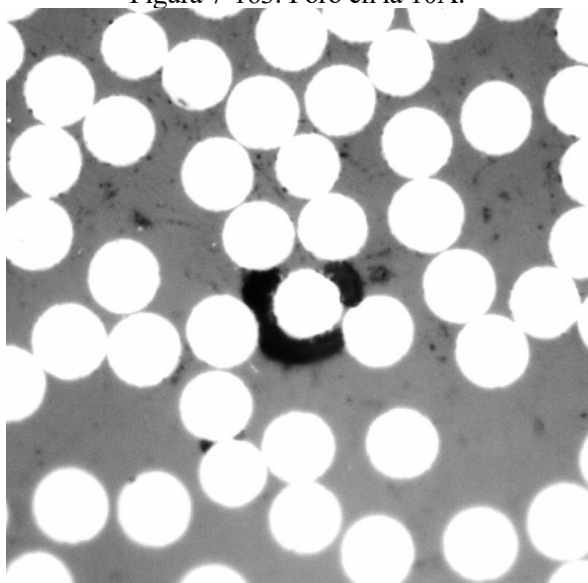


Figura 7-165. Poro en la 8B.

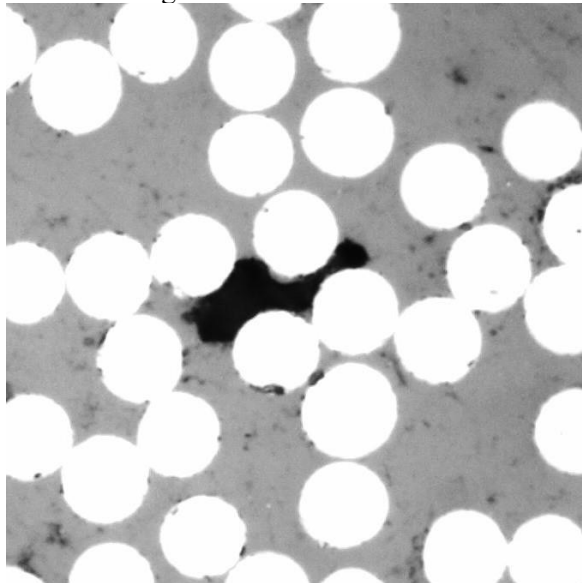


Figura 7-166. Poro en la 8B.

### 7.2.3 Probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura

A continuación se analiza el daño en la sección de las láminas a  $90^\circ$  en las dos muestras de cada panel que han sido ensayadas al 70% de la tensión de rotura media del laminado. Antes de continuar se recalca el hecho de que estas muestras, al igual que las del 90%, solo han recibido un ciclo de lijado y pulido.

Procediendo de la misma forma que en los dos casos anteriores, se comienza analizando la tendencia seguida por las grietas transversales en las cercanías de la lámina a  $0^\circ$ .

Para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , se observa lo mismo que en las muestras ensayadas al 80% de carga: aunque la tendencia de las grietas en las cercanías a la lámina de  $0^\circ$  es continua y recta se observan casos de grietas que se bifurcan en dos o más ramas alcanzándose distancias máximas entre ellas de unos 3 diámetros de fibra. Es decir, se aprecia un mayor número de bifurcaciones al final de una grieta que en la muestra del panel A ensayada al 90% y una menor distancia máxima entre dos ramas de la bifurcación en las cercanías de las láminas a  $0^\circ$  que en las muestras al 80%. El hecho de que se aprecie un mayor número de bifurcaciones cerca de las láminas a  $0^\circ$  en las muestras ensayadas al 70% que al 90% descarta la relación de estas con el ciclo de lijado y pulido, pues en las muestras ensayadas a ambos porcentajes de carga se ha aplicado el mismo. Por tanto, se puede atribuir este fenómeno al hecho de que estas bifurcaciones se dan en una proporción muy baja y el área rastreada al 70% es el doble que la rastreada al 90%, o a que este tipo de defecto no presente relación con el nivel de carga aplicado. En las Figuras 7-167 y 7-169 se ven ejemplos de grietas que acaban de forma continua en el panel A, mientras que las Figuras 7-168 y 7-170 representan grietas que se bifurcan en el panel A.

En el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , como para el resto de porcentajes de carga estudiadas, presenta porcentajes similares de grietas que terminan de forma continua (Figura 7-171) y grietas que terminan en una bifurcación (Figuras 7-172 y 7-174). Además, la distancia máxima alcanzada por estas ramificaciones es mucho mayor que para el panel A, llegando a los 15 diámetros de fibra. En la Figura 7-171 se muestra un ejemplo de una grieta que termina de forma continua pero presenta despegues en sus fibras vecinas y que, presumiblemente, con la aplicación de un mayor nivel de carga provocaran una bifurcación.

Para el 70% de carga también se han apreciado despegues adyacentes cerca de la interfaz de separación entre las láminas a distinta orientación, pero no ese tipo de defecto en el que aparece despegue en varias fibras consecutivas extendiéndose hacia la matriz. En la Figura 7-175 aparece un despegue aislado cerca de las láminas a  $0^\circ$ , defecto observable en las muestras de ambos paneles, mientras que en la Figura 7-176 aparece una serie de despegues aislados consecutivos tal y como sucedía con el defecto observado y descrito para las muestras al 80% y al 90%, pero que en lugar de extenderse de la fibra a la matriz parecen hacerlo de la interfaz de separación entre láminas a la matriz.

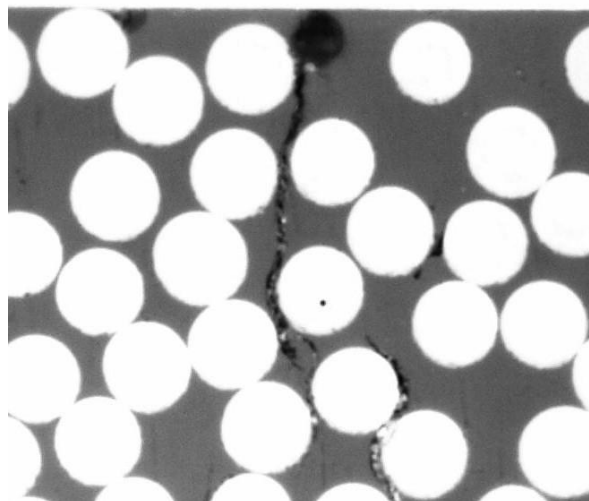


Figura 7-167. Terminación de grieta en la 20A.

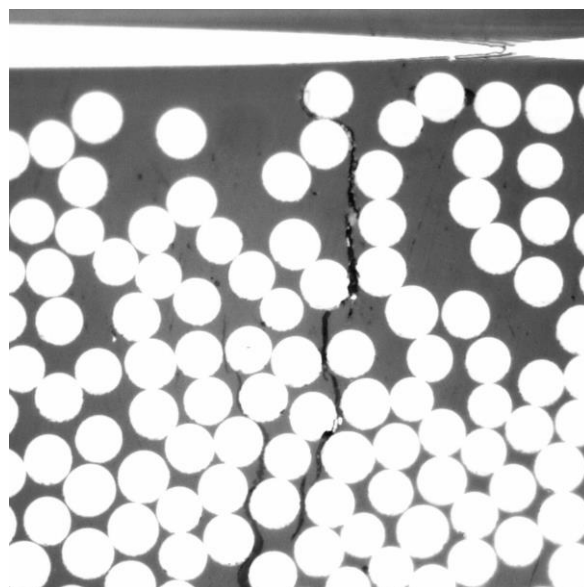


Figura 7-168. Terminación de grieta en la 20A.

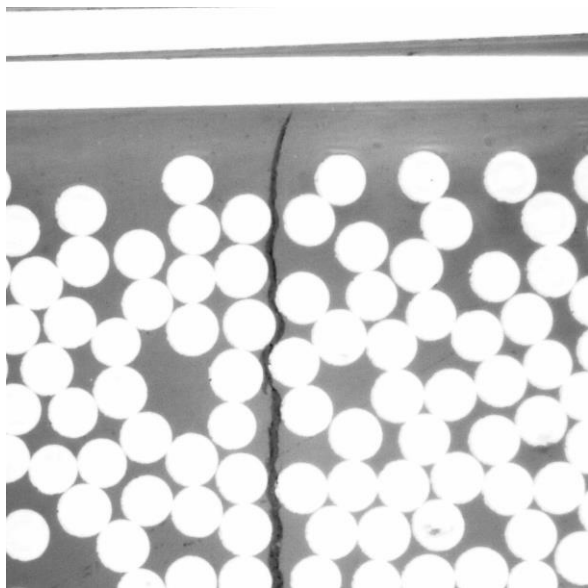


Figura 7-169. Terminación de grieta en la 24A.

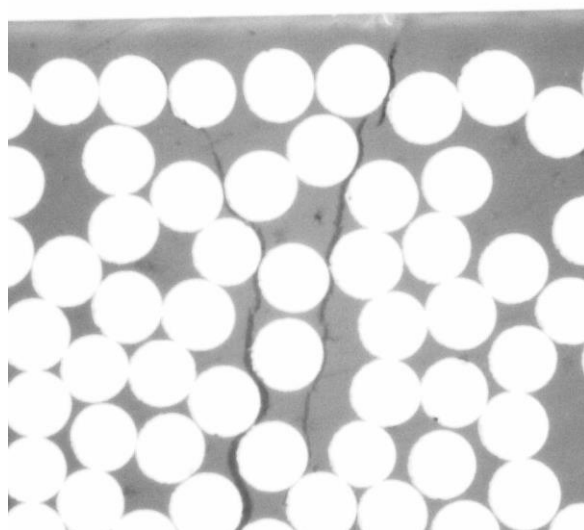


Figura 7-170. Terminación de grieta en la 24A

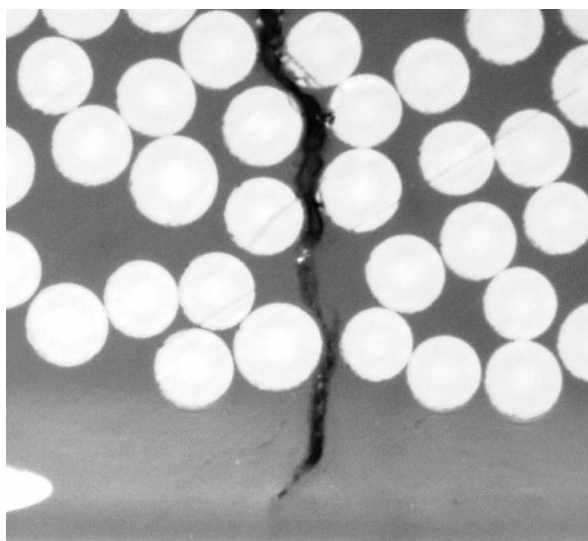


Figura 7-171. Terminación de grieta en la 23B.

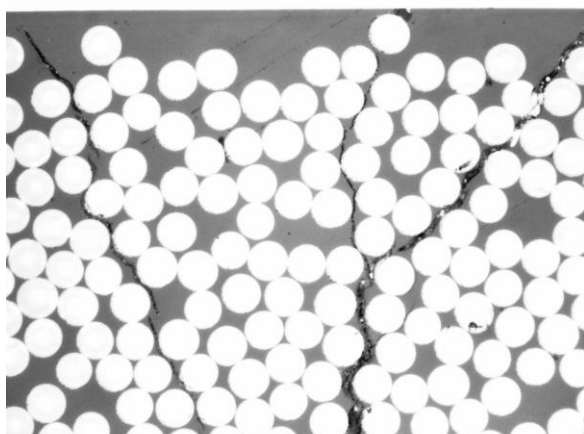


Figura 7-172. Terminación de grieta en la 23B.

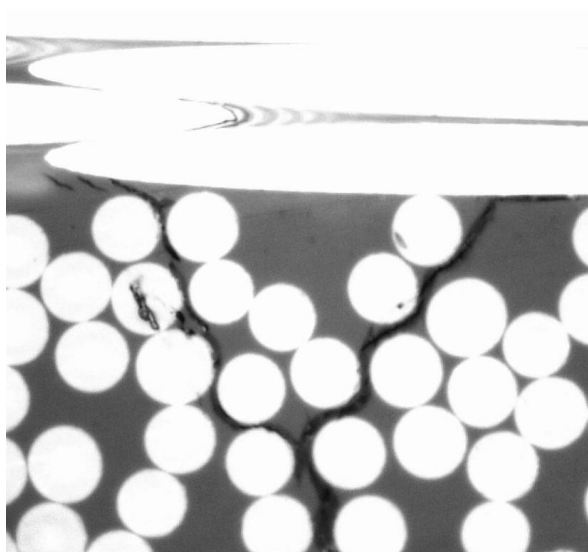


Figura 7-173. Terminación de grieta en la 24B.

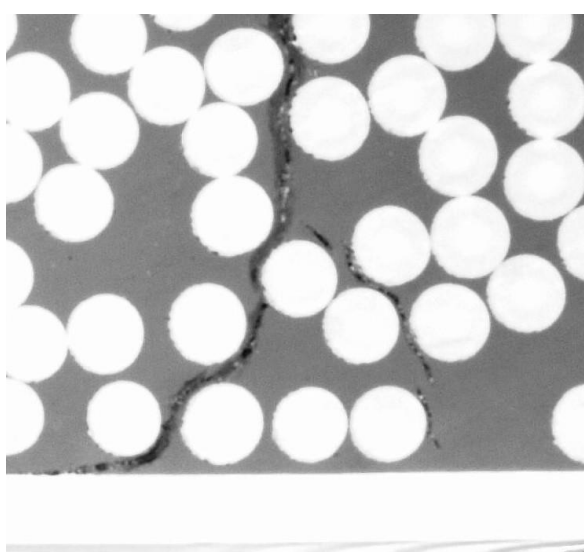


Figura 7-174. Terminación de grieta en la 24B.



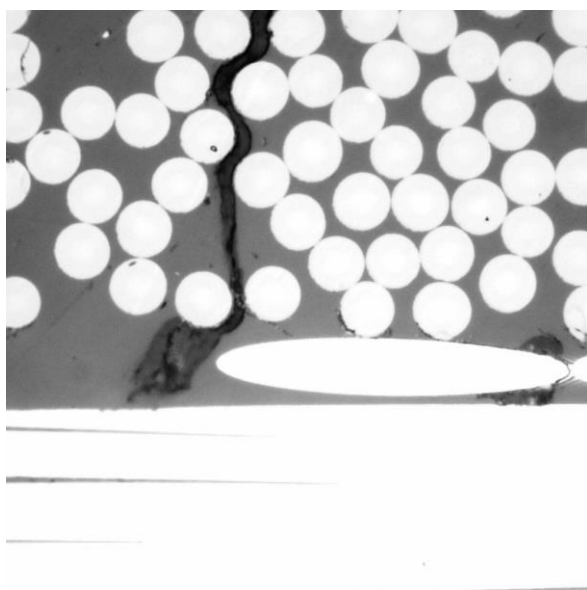


Figura 7-175. Terminación de grieta en la 23B.

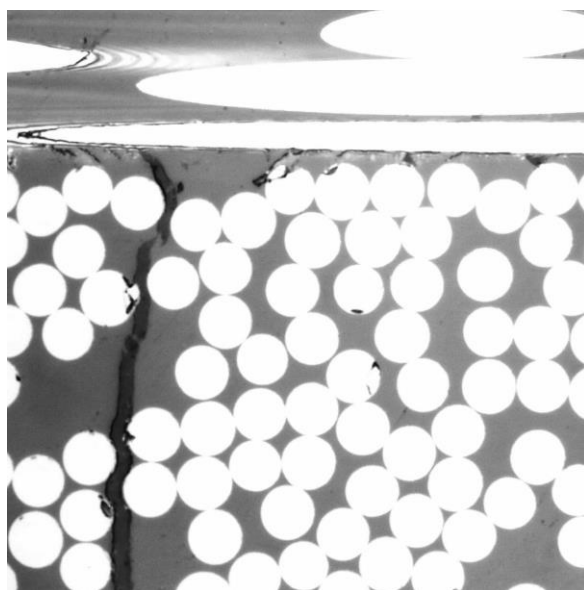


Figura 7-176. Terminación de grieta en la 23B.

Se pasa ahora al análisis de la parte central de las muestras. En primer lugar se hace un estudio del daño alrededor de la grieta y, a continuación, este se extiende al resto de la sección.

En el análisis alrededor de la grieta se estudia, al igual que para el resto de niveles de carga, alcance de los despegues alrededor de la grieta, alcance y longitud de las microgrietas alrededor de la grieta y bifurcaciones de la macrogrieta en distintas ramas.

Comenzando con el estudio de despegues aislados alrededor de la grieta para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , se puede concluir que al igual que se observó para el 90% estos discurren de forma cercana a la macrogrieta, a distancias de 1 o 2 diámetros de fibra, observándose el siguiente despegue más cercano a una distancia de unos 5 diámetros de fibra, sin daño apreciable en las fibras vecinas por lo que no se ha tenido en consideración como daño alrededor de la macrogrieta. En análisis posteriores, cuando el daño conecta desde la macrogrieta a fibras a estas distancias, si que se ha considerado como daño alrededor de la macrogrieta.

En las Figuras 7-177 a 7-180 se recogen despegues cercanos a la grieta en las muestras ensayadas al 70%. En la Figura 7-181 se aprecia el siguiente despegue aislado más cercano. La Figura 7-183 uno más lejano.

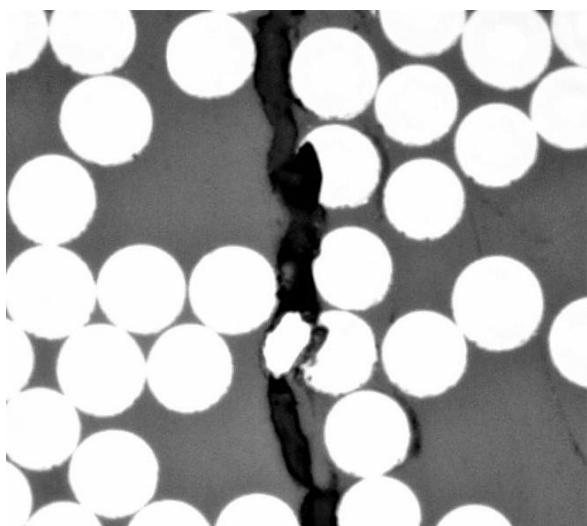


Figura 7-177. Despegue en la 20A.

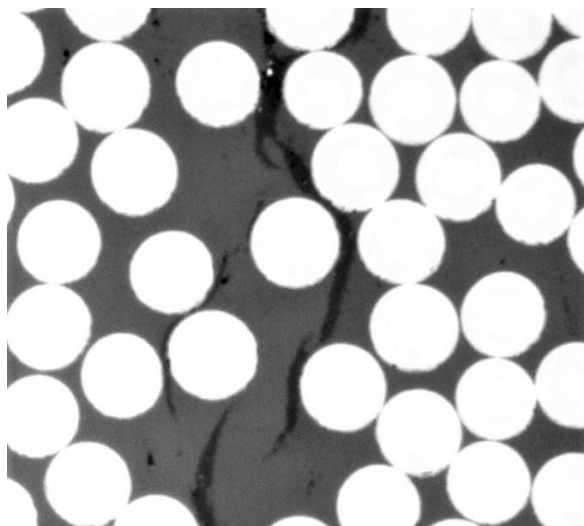


Figura 7-178. Despegue en la 20A.

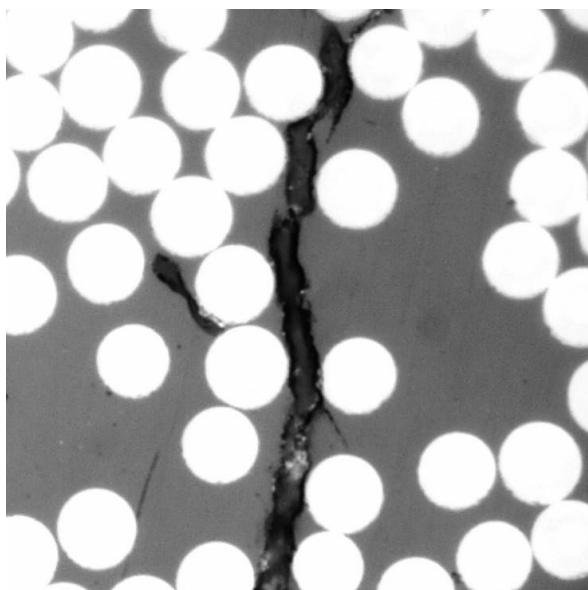


Figura 7-179. Despegue en la 20A.

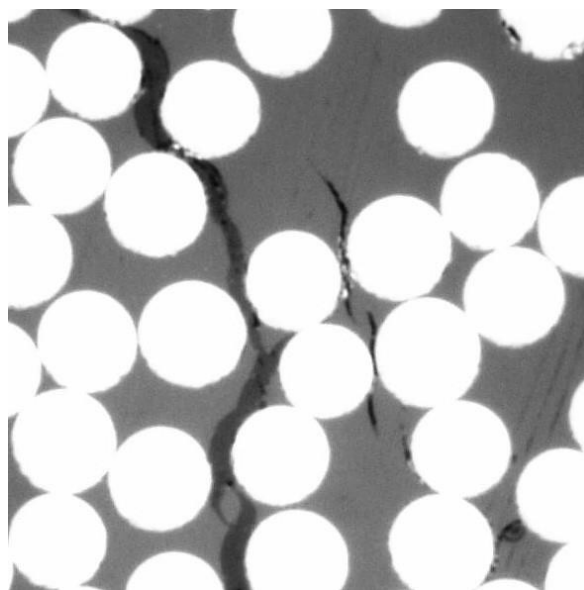


Figura 7-180. Despegue en la 20A.

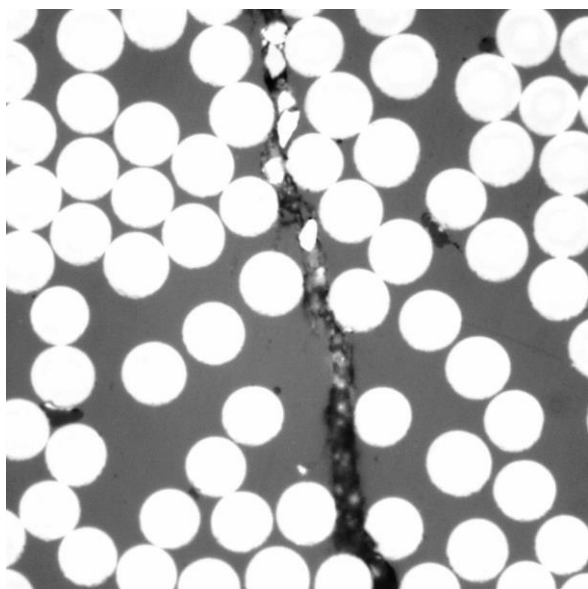


Figura 7-181. Despegue en la 20A.

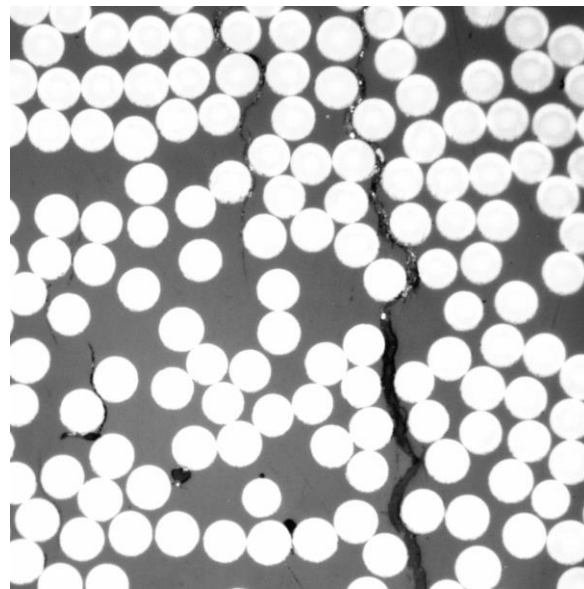


Figura 7-182. Despegue en la 20A.

En el análisis de los despegues aislados en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , se ha apreciado la misma tendencia, es decir, estos se presentan de manera cercana a la macrogrieta, a distancias de uno o dos diámetros de fibra. Ejemplos de despegues encontradas en las muestras del panel B ensayadas al 70% se recogen en las Figuras 7-183 a 7-188. La Figura 7-188 se corresponde con el siguiente despegue más cercano encontrado a una distancia mayor, de unos 6 diámetros de fibra, que al igual que el para el panel A no se ha considerado como daño alrededor de la fibra.

Se puede concluir por tanto, que al igual que en el estudio de este defecto realizado al 80% de carga, no se aprecian diferencias destacables respecto a este tipo defecto.



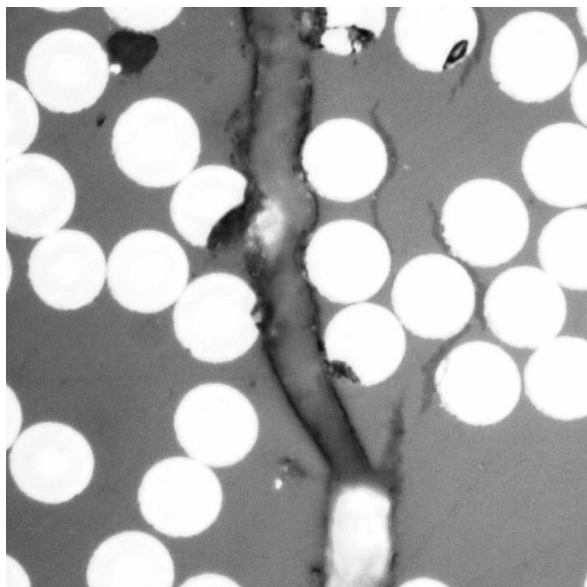


Figura 7-183. Despegue en la 23B.

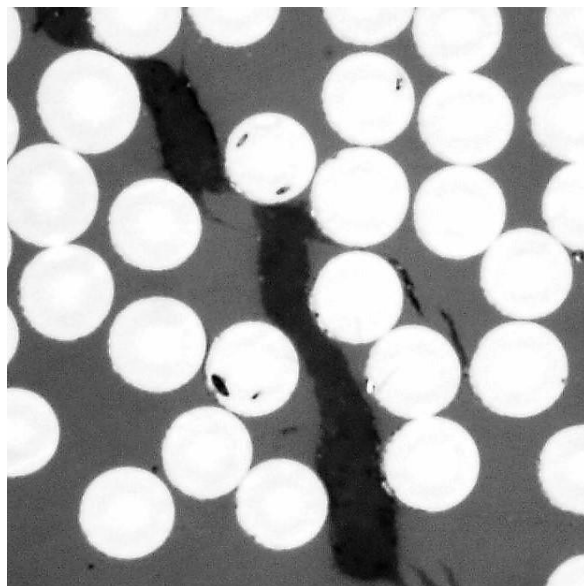


Figura 7-184. Despegue en la 23B.

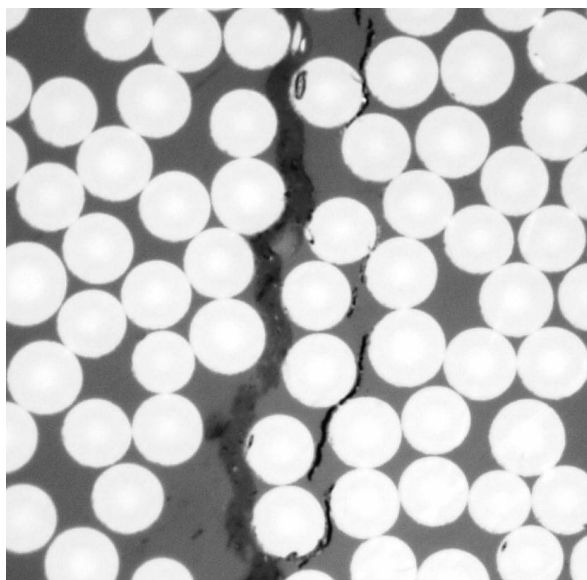


Figura 7-185. Despegue en la 23B.

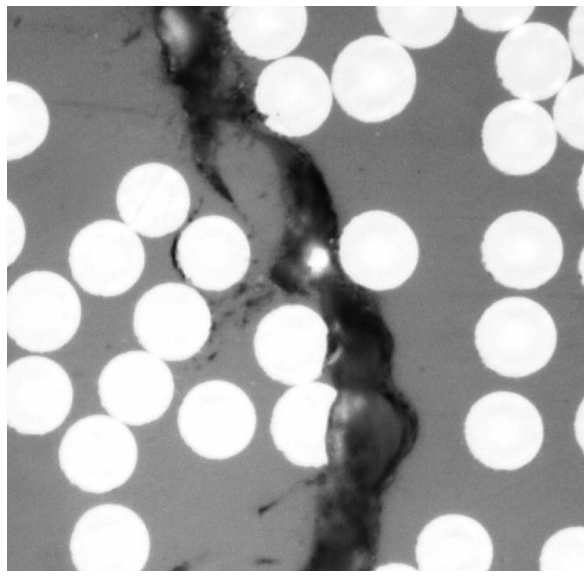


Figura 7-186. Despegue en la 23B.

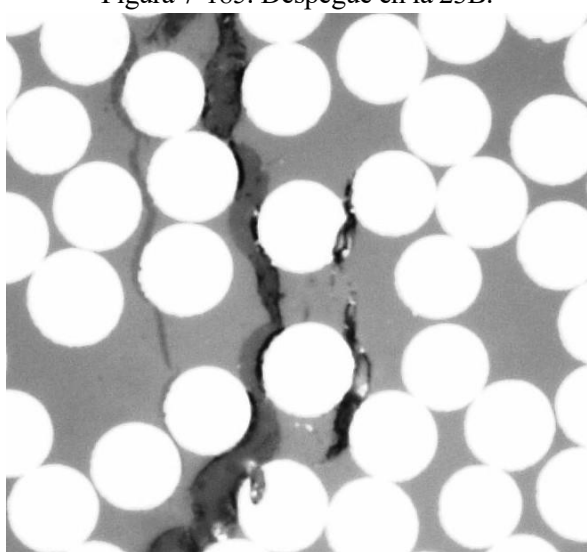


Figura 7-187. Despegue en la 23B.

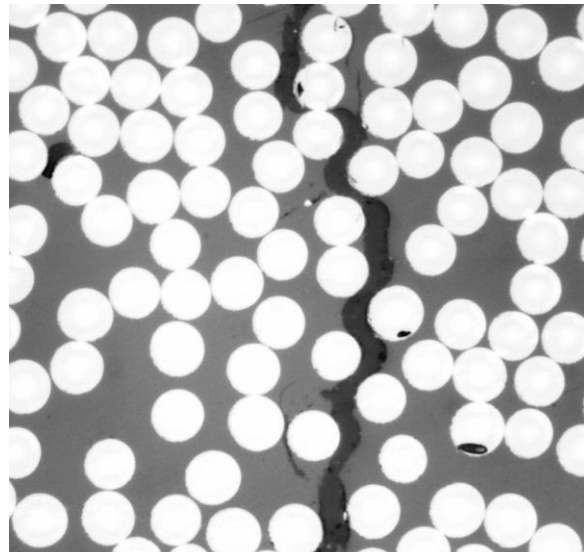


Figura 7-188. Despegue en la 23B.

Una vez analizados los despegues se pasa al análisis de microgrietas alrededor de una macrogrieta. Para el panel A se observa que este tipo de defecto alcanza distancias importantes del orden de 7 diámetros de fibra, correspondiéndose con distancia del mismo orden que se dan en las muestras analizadas para el 80% de carga. Además, se vuelve a ver la tendencia de este tipo de daño en el panel A a no alejarse demasiado de la macrogrieta volviendo a acercarse en su camino apreciado a mayores porcentajes de carga.

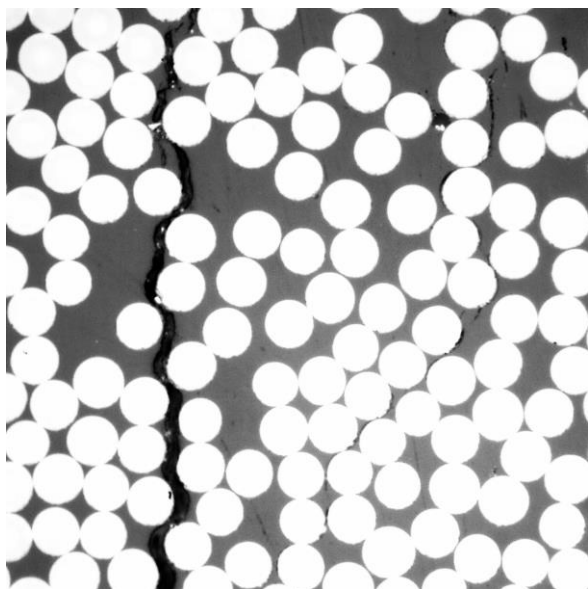


Figura 7-189. Microgrieta en la 20A.

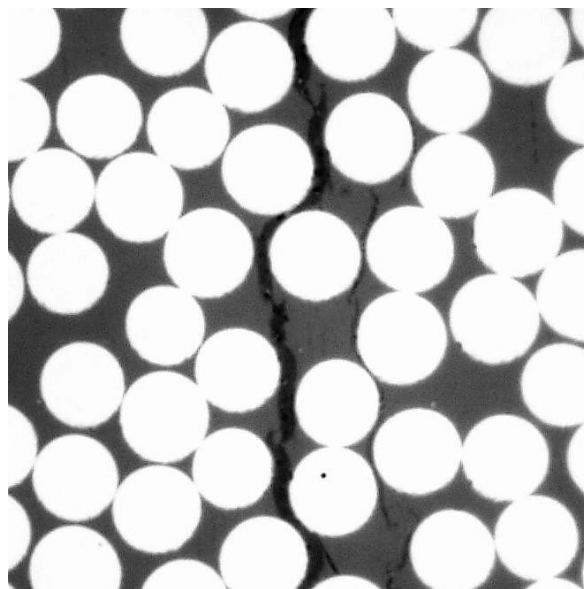


Figura 7-190. Microgrieta en la 20A.

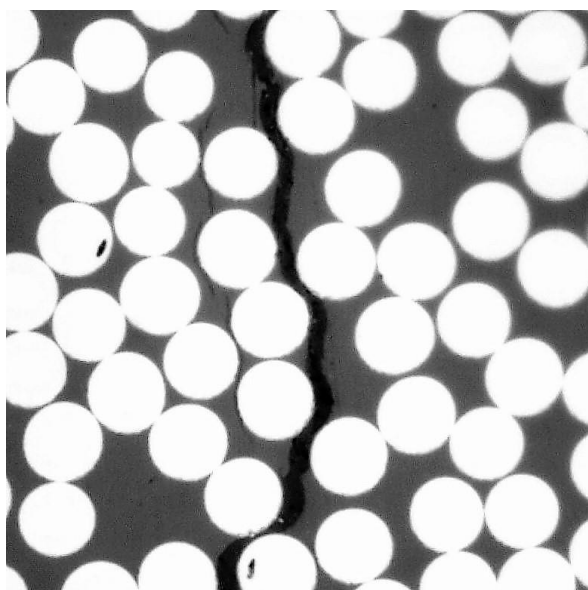


Figura 7-191. Microgrieta en la 20A.

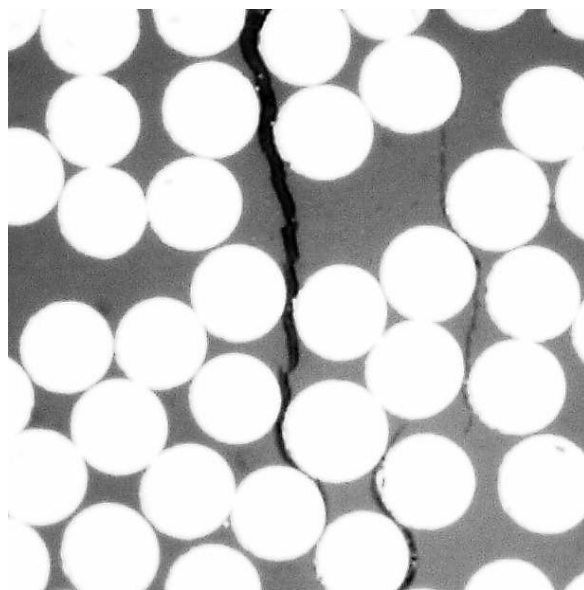


Figura 7-192. Microgrieta en la 24A.

En el panel B se observan una mayor tendencia de las microgrietas a no abrirse demasiado y a discurrir de manera más o menos paralela al camino seguido por la macrogrieta, tendiendo a volver a acercarse a esta aunque presente ligeras variaciones del camino paralelo. Esta tendencia es la ya observada y comentada que cumplen las microgrietas del panel A, luego para este porcentaje de carga se aprecia una mayor similitud en este tipo de defecto. Además, la máxima distancia observada respecto a la macrogrieta de uno de estos defectos es de unos 7 diámetros de fibra, lo que también concuerda con lo observado para el panel A. En las Figuras 7-193 y 7-194 se recogen ejemplos de microgrietas en el panel B.

Por tanto, en la comparación de microgrietas alrededor de la fibra no se pueden distinguir diferencias claras, presentado en mismo comportamiento.

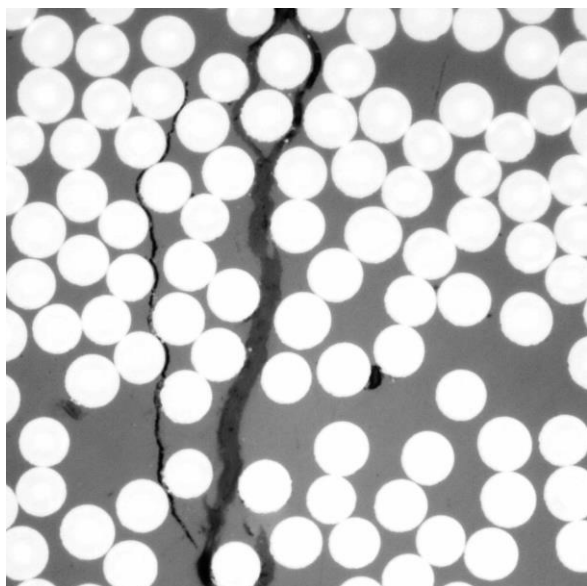


Figura 7-193. Microgrieta en la 23B.

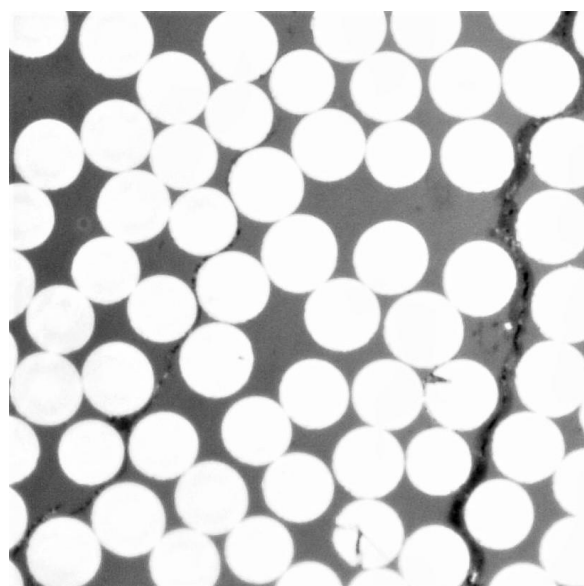


Figura 7-194. Microgrieta en la 23B.

Una vez analizadas las microgrietas alrededor de la grieta se pasa al siguiente nivel: bifurcaciones que sufre la grieta en su recorrido y que se presuponen como microgrietas que con la mayor aplicación de carga han aumentado su recorrido uniéndose a la grieta.

Para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , se sigue observando la mayor tendencia de las grietas a abrirse menos que en el panel B y presentar un recorrido más continuo. La máxima distancia apreciada por este defecto respecto a la macrogrieta es de 6 diámetros de fibra, lo que está dentro del rango observado para el resto de porcentajes de carga, donde se observan distancias máximas de entre cuatro y cinco diámetros de fibra.

En cuanto a las grietas incompletas, para estas muestras se aprecian distancias máximas entre dos segmentos de grieta de unos 11 diámetros de fibra, lo que supera las distancias observadas en la muestra al 80% y al 90%, de 8 y 4 diámetros de fibra, respectivamente.

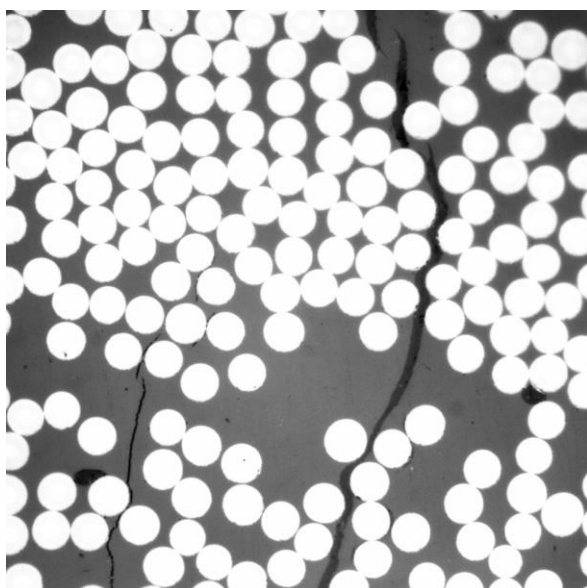


Figura 7-195. Bifurcación en la 20A.

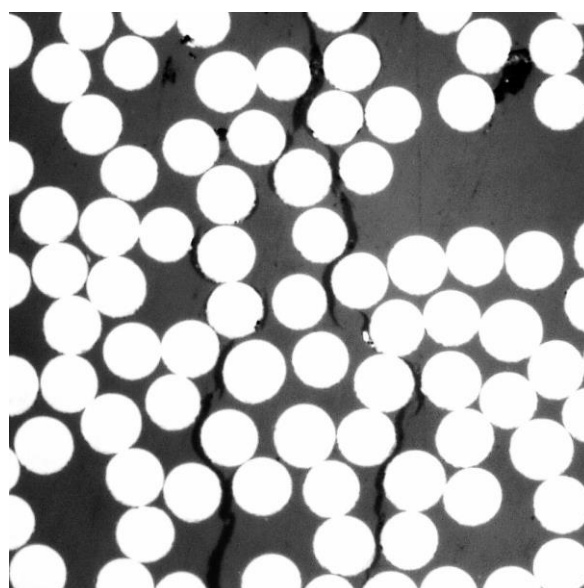


Figura 7-196. Bifurcación en la 20A.

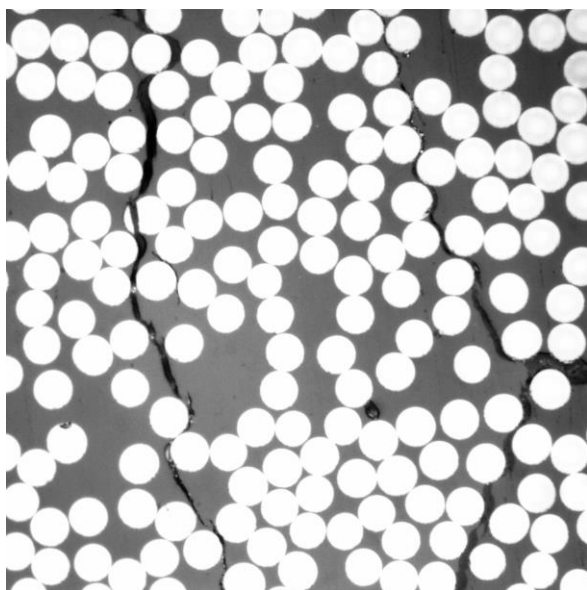


Figura 7-197. Grieta que no une en la 20A.

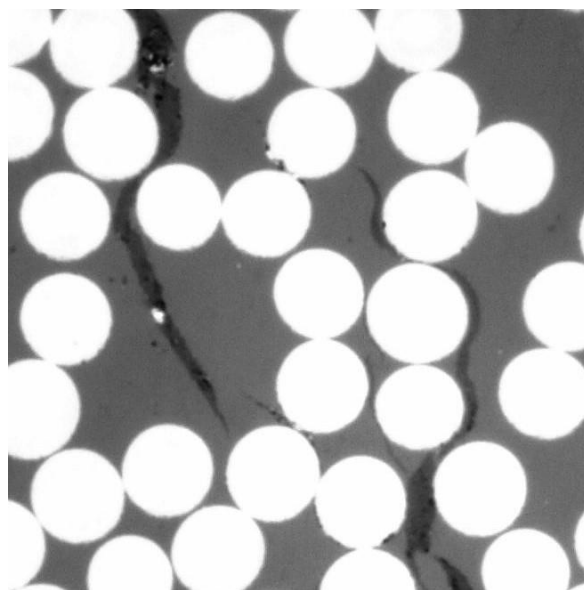


Figura 7-198. Grieta que no une en la 20A.

Para el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , al igual que para el resto de niveles de carga, se aprecia una mayor tendencia de las grietas a abrirse y bifurcarse. Las distancias máximas de este tipo de defecto encontradas en las muestras ensayadas al 70% es de unos 11 diámetros de fibra, tal y como se aprecia en la Figura 7-202.

En cuanto a las grietas incompletas no se observan en estas muestras la tendencia observada para más altos niveles de carga de que los dos fragmentos que se unen sean fragmentos de grieta oblicua, es decir, que se desvían de su camino recto presentado una tendencia desviada hasta que se unen en el centro de la grieta. Los segmentos de grietas incompletas observadas para el 70% presentan una tendencia recta. Esto se puede relacionar con el hecho de que las distancias máximas observadas entre dos segmentos de grieta incompletas son ahora de unos 8 diámetros de fibra, del orden de lo observado en el panel A, desapareciendo las diferencias observadas en este tipo de defecto para mayores niveles de carga.

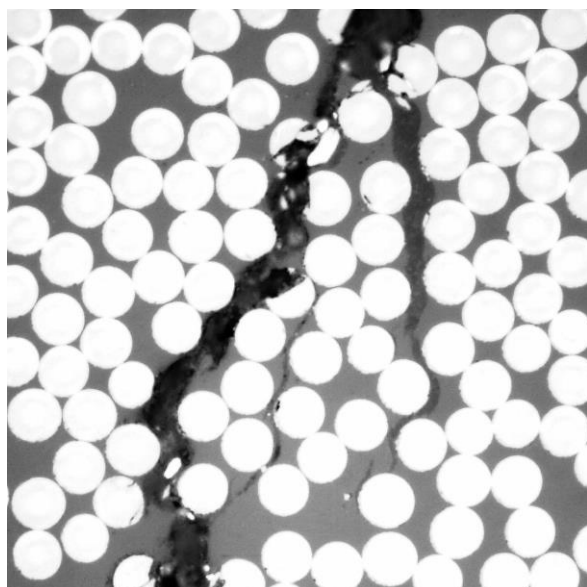


Figura 7-199. Bifurcación en la 23B.

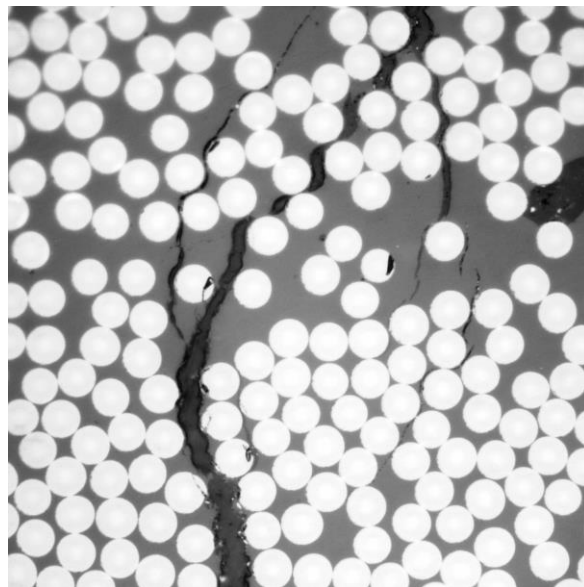


Figura 7-200. Bifurcación en la 23B.

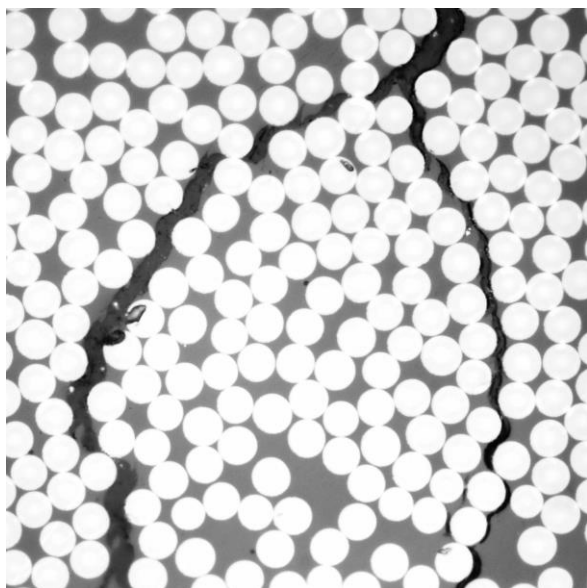


Figura 7-201. Bifurcación en la 23B.

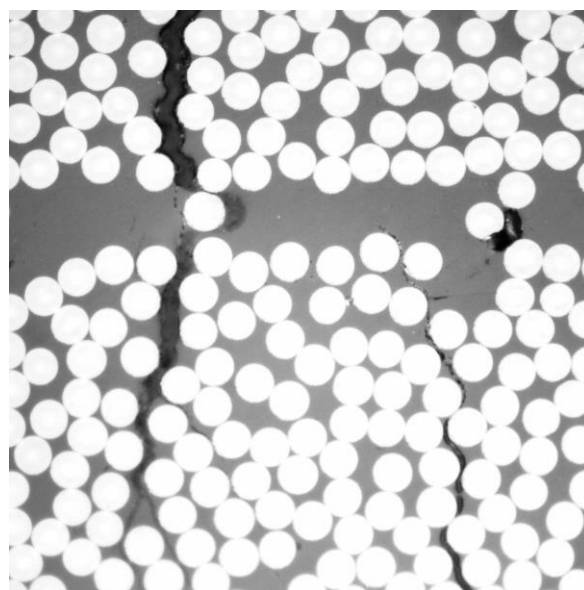


Figura 7-202. Grieta discontinua en la 23B.

En cuanto a defectos como la rotura de fibra, para este nivel de aplicación de carga tampoco se aprecian diferencias entre ambos paneles.

Cocluido el análisis del daño alrededor de las macrogrietas se pasa al análisis en el resto de la sección. En primer lugar se estudia la aparición de grietas incompletas. Como se ha visto anteriormente, este defecto aparece para ambos paneles, aunque en distinta proporción, presentando una densidad de 0.18 grietas discontinuas por centímetro en el panel A frente a 0.452 grietas discontinuas por centímetro en el panel B. Por tanto, a pesar de presentar una mayor proporción en el panel B la diferencias que aparecen para este tipo de defecto también se atenúan.

Al igual que al 80% se han apreciado muestras de este defecto no solo cerca de las láminas a  $0^\circ$ , si no que se han observado casos (aislados) de grietas incompletas en la sección central.

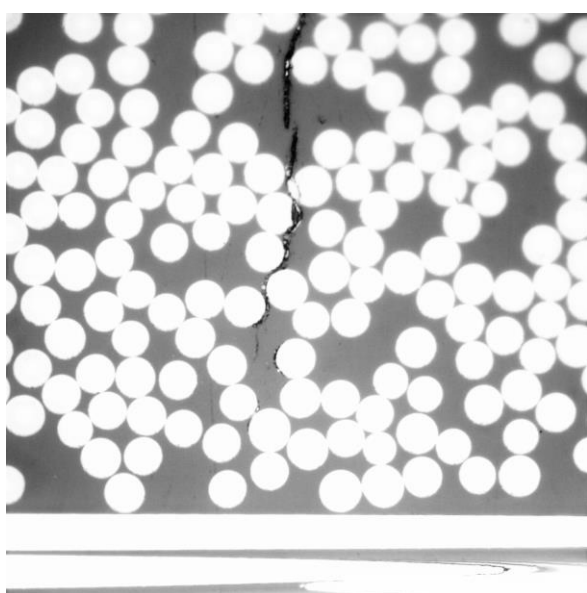


Figura 7-203. Grieta incompleta en la 20A.

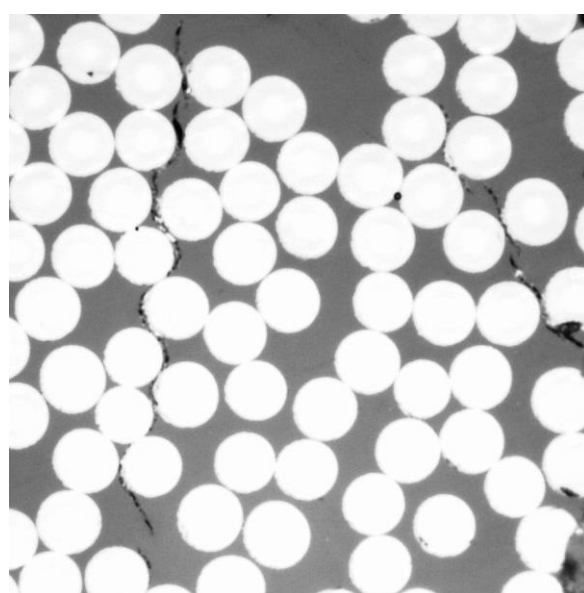


Figura 7-204. Grieta incompleta en la 23B.

En cuanto a otro tipo de defectos, como porosidades y despegues aislados en la sección central, no se han encontrado diferencias con respecto a lo expuesto para muestras ensayadas a mayores niveles de carga.

#### 7.2.4 Probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura

Al 60% de la carga de rotura se han ensayado dos probetas de cada panel que a la hora de la preparación de muestras para ser observadas en el microscopio han sido sometidas a un solo ciclo de lijado y pulido.

En la exposición de daño alrededor de la grieta, se muestra lo observado cerca de las láminas a  $0^\circ$ . Se aprecian para ambos paneles grietas que se bifurcan al llegar a las cercanías a la lámina de  $0^\circ$ , alcanzando estas bifurcaciones para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , unas distancias máximas respecto a la macrogrieta de unos 3 diámetros de fibra, frente a los 6 que alcanzan en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ . Se observa también que las bifurcaciones del panel B tienen más recorrido, es decir, parten de una mayor distancia a la lámina a  $0^\circ$ , facilitando el que alcancen una mayor distancia respecto a la macrogrieta. En las Figuras 7-205 y 7-206 se aprecian bifurcaciones cerca de las láminas a  $0^\circ$  observadas en cada panel.

Para este nivel de carga no se han apreciado despegues cercanos a la lámina de  $0^\circ$  correlativos ni que se extiendan hacia la matriz, tal y como sucedía para el resto de niveles de carga.

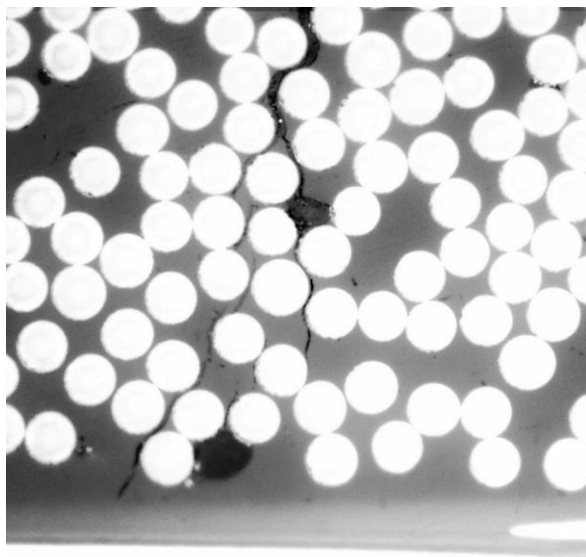


Figura 7-205. Bifurcación en la 21A.

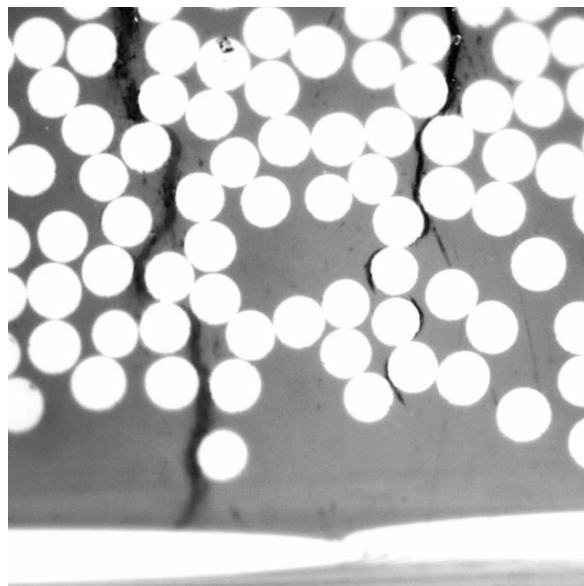


Figura 7-206. Bifurcación en la 21B.

En segundo lugar se analiza la presencia de despegues aislados, microgrietas y bifurcaciones alrededor de la macrogrieta, donde se encuentra una importante disminución para ambos laminados.

En cuanto al número de despegues aislados cerca de una macrogrieta, se dan en ambos laminados la misma tendencia. Se aprecian numerosos despegues que forman un despegue bilateral respecto con una fibra que ha sido alcanzada por la macrogrieta, sin embargo la presencia de despegues alrededor de la grieta a distancias de dos o tres diámetros de fibra, se hace casi inexistente. A distancias mayores, de unos 4 diámetros de fibra si que se aprecian defectos bordeando la matriz, tal y como se aprecia en la Figura 7-208, pero el no haber otro tipo de daño que conecte estos fallos con la macrogrieta no se ha considerado en el presente análisis como daños alrededor de la macrogrieta.



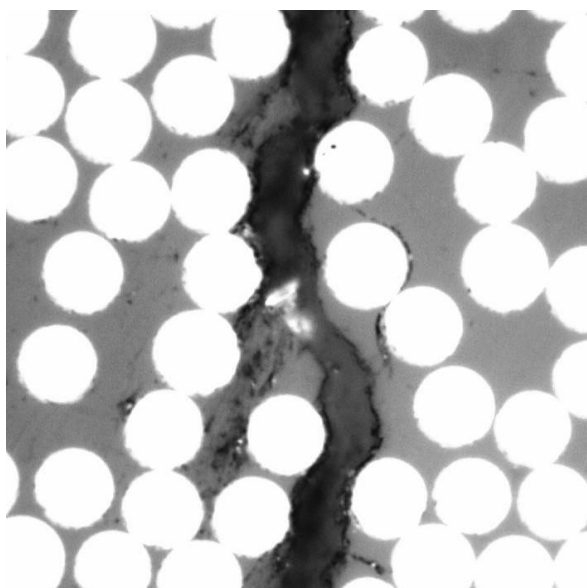


Figura 7-207. Despegue en la 21B.

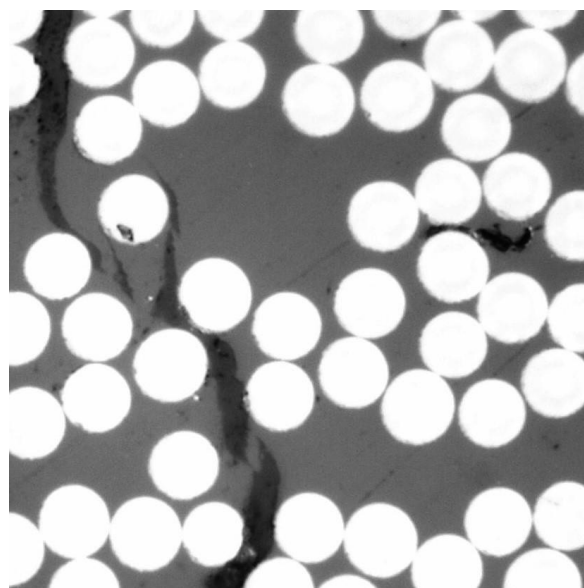


Figura 7-208. Despegue en la 21A.

A continuación, se analizan las microgrietas, definiendo estas como la coalescencia de despegues a través de más de una fibra que no se unen con la macrogrieta, pues de hacerlo se ha denominado bifurcación.

Para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , se ha observado, igual que con los despegues, que las microgrietas permanecen cercanas a la macrogrieta, con distancias máximas en torno a los dos diámetros de fibra. Sin embargo, en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , si que se han observado microgrietas a distancias mayores, con distancias de hasta 4 diámetros de fibra respecto de la macrogrieta. Se vuelve a apreciar aquí la mayor tendencia que existe en el panel B del daño a abrirse en la dirección perpendicular a la macrogrieta.

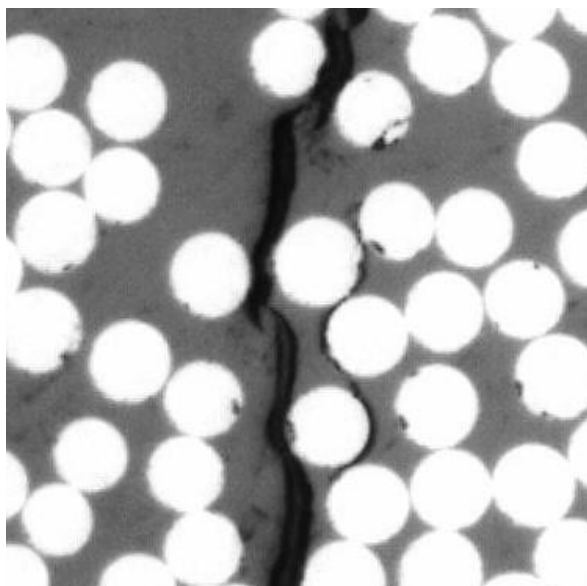


Figura 7-209. Microgrieta en la 22A.

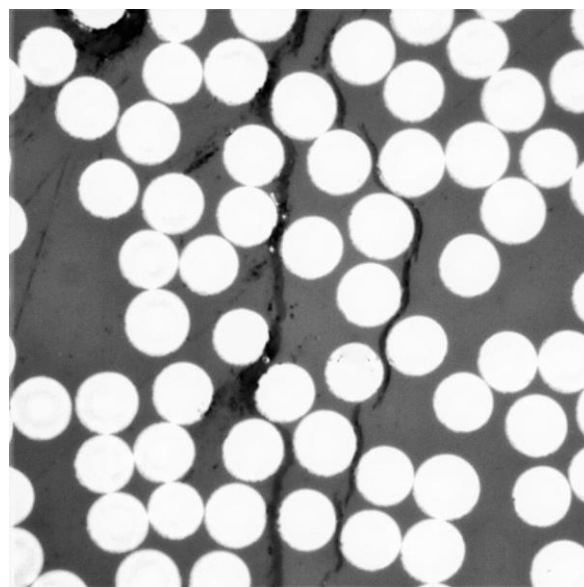


Figura 7-210. Microgrieta en la 21A.

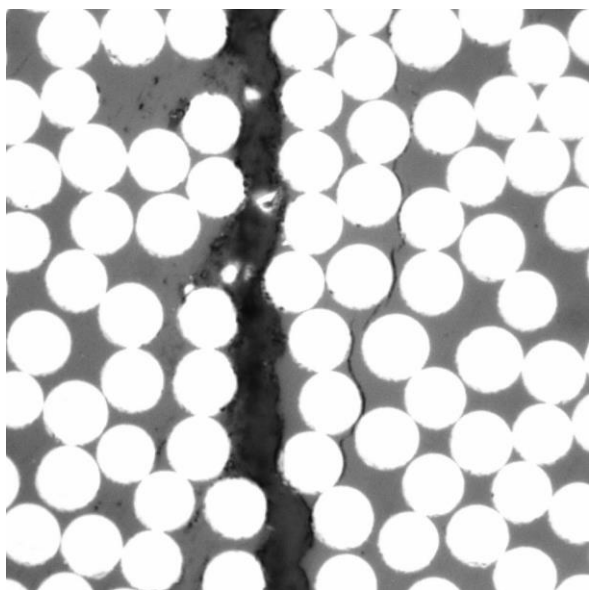


Figura 7-211. Microgrieta en la 21A.

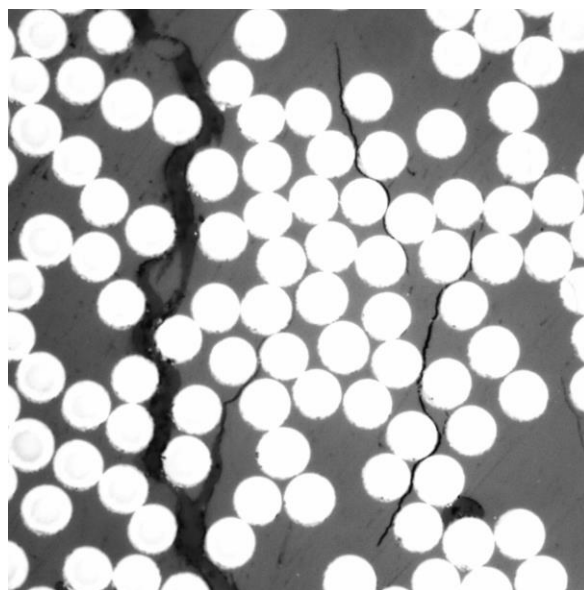


Figura 7-212. Microgrieta en la 22B.

Tras el estudio del daño alrededor de la grieta se pasa ahora al análisis de bifurcaciones y grietas discontinuas.

En el estudio de bifurcaciones se mantiene la tendencia observada en el resto de niveles de carga de formarse con mayor frecuencia en grietas del panel B que en grietas del panel A, que siguen un camino más continuo. En cuanto a distancias alcanzadas con respecto a la macrogrieta, se aprecian distancias máximas de unos 6 diámetros de fibra en el panel A, y unos 7 en el panel B. Es decir, aunque se presente en mayor cantidad en el panel B este defecto presenta el mismo comportamiento alrededor de ambos paneles.

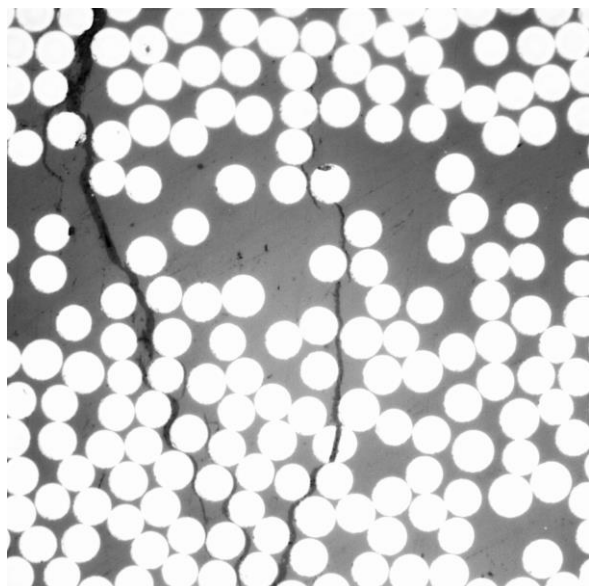


Figura 7-213. Bifurcación en la 21A.

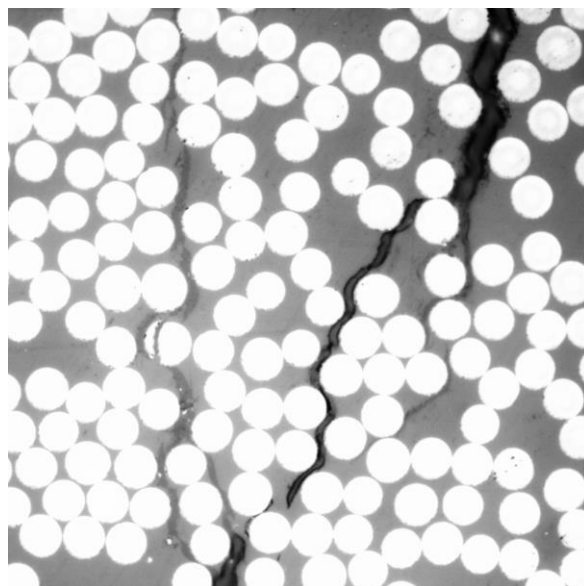


Figura 7-214. Bifurcación en la 21B.

Pasando al estudio de grietas discontinuas, se aprecia, al igual que sucedía para el 70%, que los fragmentos de grieta no tienden a presentar una tendencia oblicua como se daba para algunos casos del panel B a mayores niveles de carga, por lo tanto se da el mismo comportamiento en ambos laminados. De hecho, la distancia máxima alcanzada por este defecto respecto de la macrogrieta es de uno 10 diámetros de fibra.



En cuanto al resto de defectos tenidos en cuenta en el análisis del daño en la sección de las láminas a  $90^\circ$ , es decir, rotura de fibra, despegues, porosidades no se dan diferencias en la forma de aparición. Sin embargo, si que se da una distinción en la formación de grietas incompletas: para el panel A no se observa ninguna mientras que en el panel B se da una densidad de 0.122 grietas incompletas por centímetro, siendo mayor por tanto el daño en la sección de  $90^\circ$  con respecto a este defecto. En cuanto a su tendencia no se han observado despegues consecutivos de forma horizontal, como si sucedía para otros niveles de carga.

### 7.2.5 Probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura

Las probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura han sido 5, que han sido sometidas al ciclo de lijado y pulido en más de una ocasión. A continuación se procede con la comparación del daño sufrido, al igual que en el resto de casos.

Recalcar que en las probetas el número de grietas contabilizadas va de 0 a 3, luego en cuanto a daño alrededor de la grieta la zona de visualización es mucho menor.

Iniciando el análisis con el comportamiento de la grieta cerca de las láminas a  $0^\circ$ , se aprecia para el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , que todas llegan de forma continua, sin presentar ninguna bifurcación. Sin embargo, en el panel B si que se aprecian bifurcaciones en esta zona, tal como la apreciada en la Figura 7-215.

En cuanto a la aparición de despegues alrededor de la grieta se observa para ambos laminados la misma tendencia: los despegues aislados son muy cercanos a la macrogrieta, a distancias de un diámetro de fibra.

Si se aumenta en el análisis el tamaño del daño buscado y se tienen en cuenta las microgrietas si que se aprecian claras diferencias: alrededor de la grieta del panel A no aparece ninguna microgrieta, mientras que alrededor de las macrogrietas del panel B aparecen microgrietas con una distancia máxima de unos cuatro diámetros de fibra, del orden de lo observado para el 80%.

En la aparición de bifurcaciones también se aprecian diferencias considerable: en el panel A aparecen bifurcaciones que no alcanzan un gran tamaño y cuya distancia máxima respecto de la macrogrieta es de 3 diámetros de fibra. Puede chocar el hecho de que existan bifurcaciones y no microgrietas alrededor de la fibra, pero estos defectos pueden tener varios orígenes. La similar tendencia observada entre las bifurcaciones vistas en estas muestras y las grietas discontinuas, cuya distancia máxima respecto a la macrogrieta es del mismo orden, pueden hacer suponer que las bifurcaciones observadas son origen de dos fragmentos de grieta que se han encontrado de esa manera en su recorrido formando una microgrieta. En las Figuras 7-217 y 7-218 se ve esta similar tendencia observada.

En el panel B las bifurcaciones alrededor de una grieta son más frecuentes y el alcance respecto a la macrogrieta mucho mayor, alcanzándose distancias de 7 diámetros de fibra. Comparando la Figura 7-217 con la Figura 7-219 se pueden ver claramente las diferencias.

En cuanto al resto de defectos tenidos en cuenta, es decir, rotura de fibra, despegues aislados y porosidades lejos de la macrogrieta no se han observado diferencias apreciables.

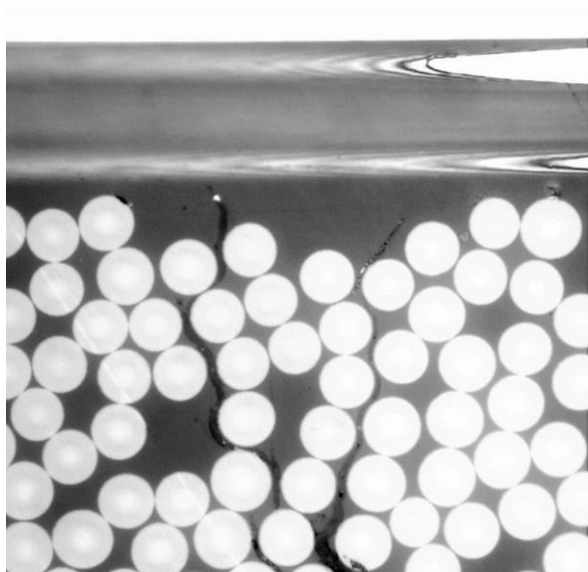


Figura 7-215. Bifurcación en la 12B.

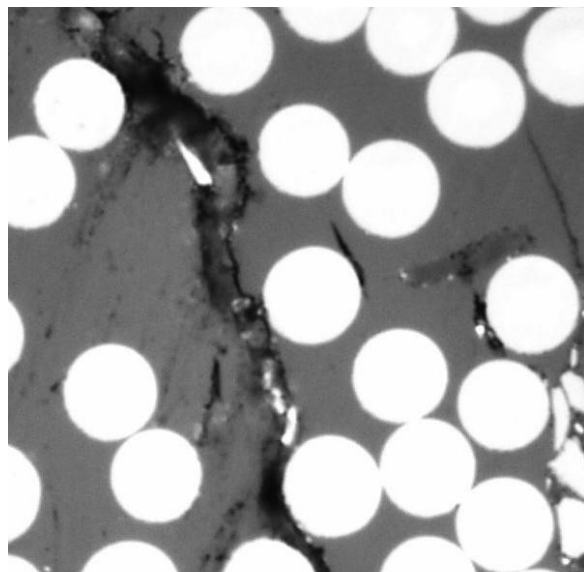


Figura 7-216. Despegue en la 12A.

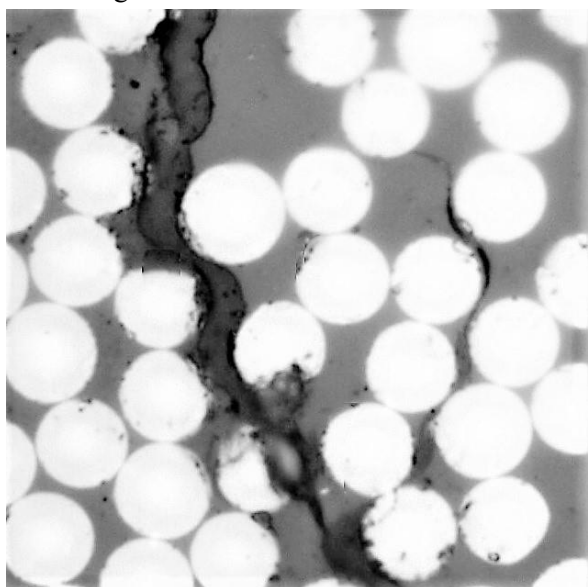


Figura 7-217. Bifurcación en la 14A.

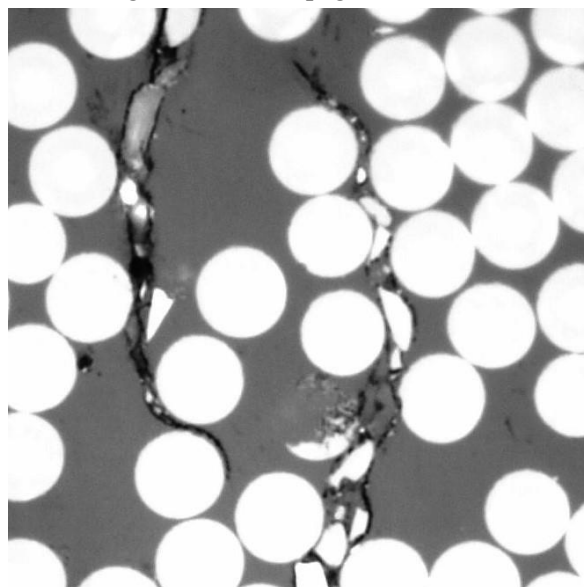


Figura 7-218. Grieta discontinua en la 14A.

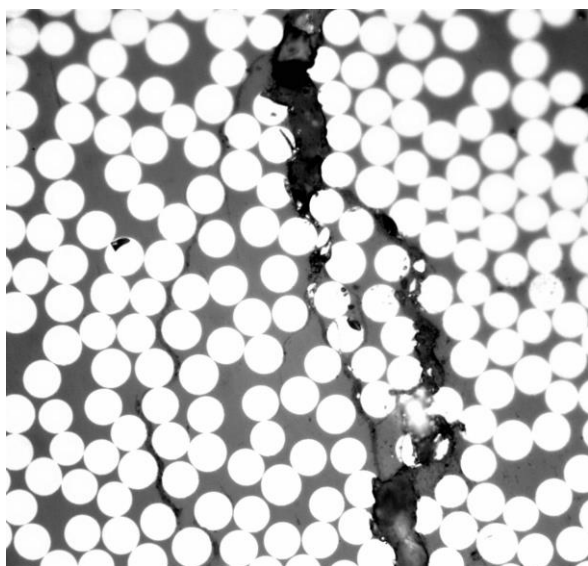


Figura 7-219. Bifurcación en la 11B.

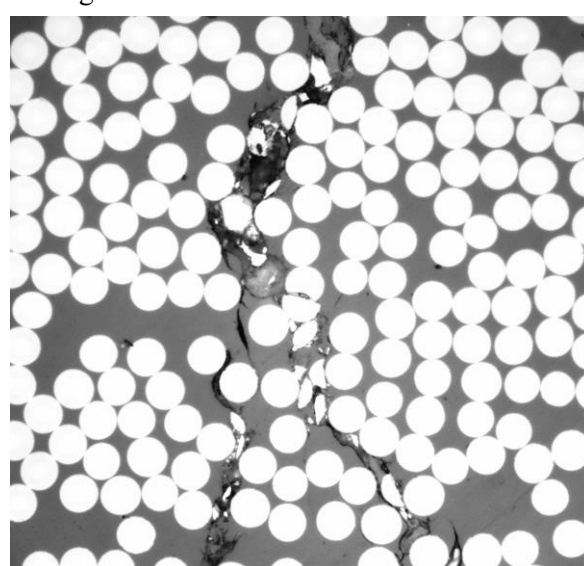


Figura 7-220. Bifurcación en la 13B.

### 7.2.6 Probetas ensayadas al 30% y al 40% de la carga de rotura

Las probetas ensayadas para cada porcentaje de carga han sido 2, y las han sido sometidas a más de un ciclo de pulido, aunque sin llegar al número de pulidos realizado en las muestras al 50% y 80% de carga.

En el análisis del daño de la sección de las láminas a  $90^\circ$ , el estudio de los defectos alrededor de una grieta transversal se basa en la única grieta observada en estas muestras, que aparece para el 40% de la carga de rotura en el panel A.

Se aprecia en esta grieta que llega a las láminas a  $0^\circ$  de forma continua, sin bifurcarse, y que a pesar de bifurcarse en la zona central la distancia máxima alcanzada por esta bifurcación está dentro de lo observado para el 50% de carga, es decir, unos 3 diámetros de fibra. Además, esta grieta no llega a unir, y al igual que en las muestras al 50% se observa la misma tendencia en la zona de no unión que en la bifurcación.

En cuanto al recuento de despegues aislados y microgrietas, no se encuentran en zonas alejadas de la microgrieta, aunque se han observado poros y otro tipo de defectos introducidos en el apartado 7.2.7.

En cuanto a grietas incompletas, o microgrietas en la sección central a  $90^\circ$ , no se ha observado ninguna a estos porcentajes de carga. Los defectos que sí que aparecen, como para el resto de niveles de carga, son despegues aislados, porosidades alrededor de una serie de fibras en una zona de menor densidad de fibra y otras heterogeneidades.

### 7.2.7 Heterogeneidades observadas en las muestras

En el barrido de las muestras con el microscopio se han observado una serie de heterogeneidades que alejan al material de un comportamiento ideal. Ejemplos de estas son una serie de círculos de fibra que aparecen o bien huecos, como en la Figura 7-221, o bien rellenos de matriz, fibras que no están orientadas perfectamente en la dirección del laminado, presentando una forma oblicua o una zona muy delaminada sin grieta o algún otro tipo de daño alrededor. En las figuras 7-221 a 7-226 se muestran una serie de ejemplos de estos defectos.

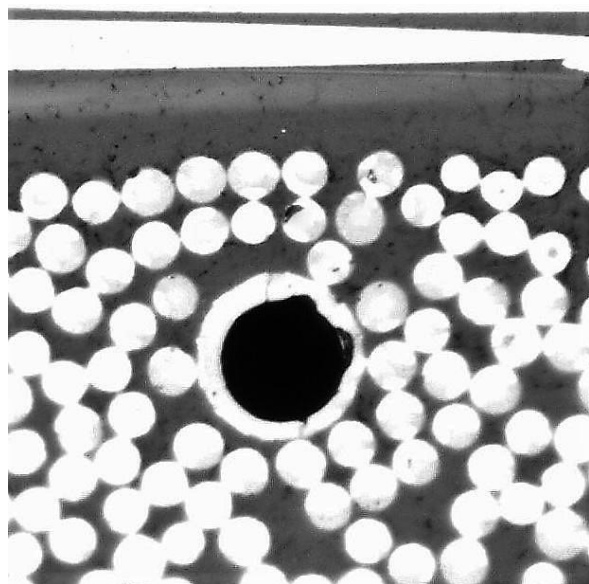


Figura 7-221. Círculo de fibra en la 6B.

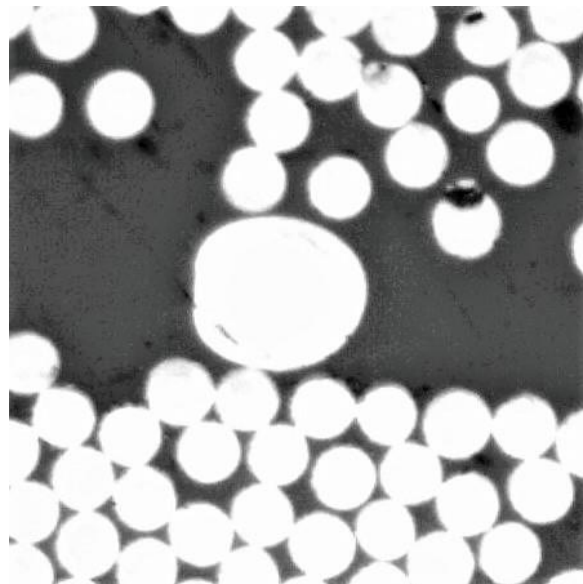


Figura 7-222. Fibra de gran tamaño en la 7A.

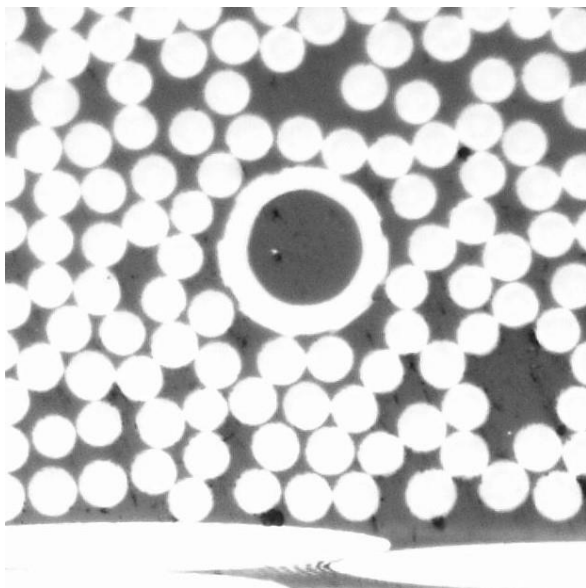


Figura 7-223. Círculo de fibra en la 7A.

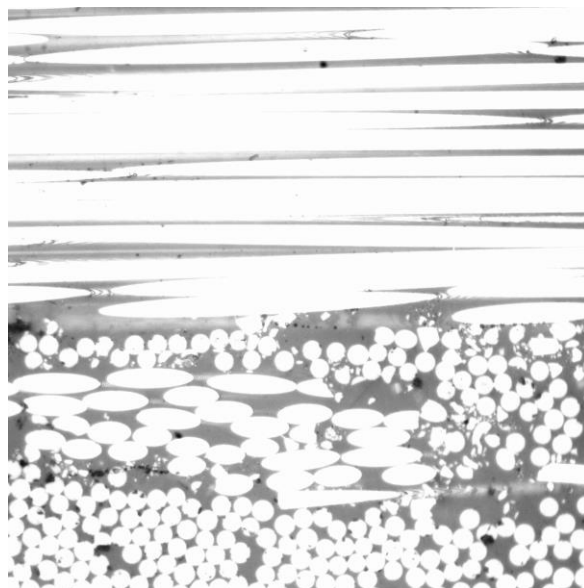


Figura 7-224. Fibras inclinadas en la 8B.

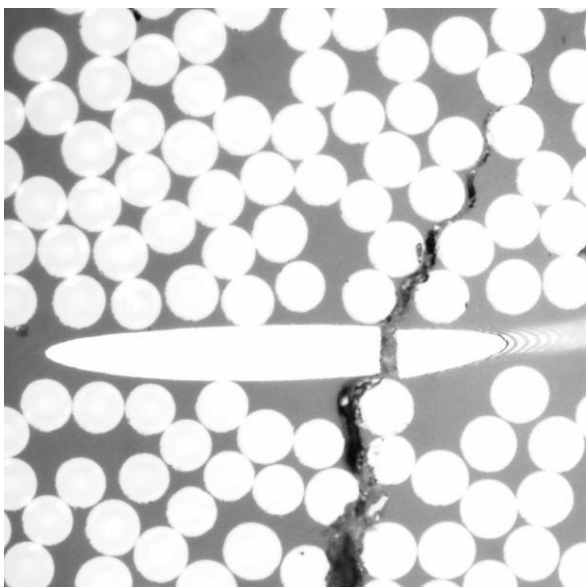


Figura 7-225. Fibra inclinada en la 23B.

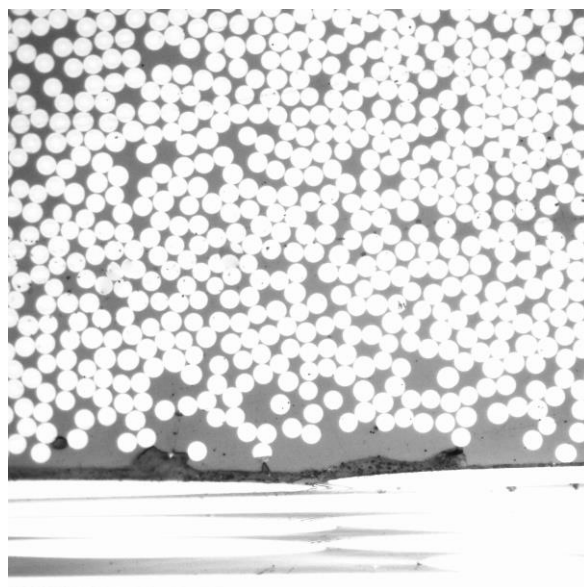


Figura 7-226. Delaminación a larg de la 15B.

### 7.2.8 Defectos en la sección de las láminas a 90°: Análisis de resultados

Del análisis de micrografías realizado se deduce, por tanto, que a pesar de que en ambos laminados se presenta el mismo tipo de daño alrededor de las macrogrietas, que en el presente documento se han clasificado en despegues, microgrietas y bifurcaciones, el daño se aleja más con respecto a la macrogrieta en el panel grueso,  $[0_2, 90_4]_S$ .

Además, este tipo de defectos clasificados no aparecen hasta la aparición de la primera grieta transversal y en la zona adyacente a ella.

Por otro lado, se ha visto que en el panel B son mas frecuentes defectos como grietas incompletas o delaminaciones, lo cual unido a su mayor tendencia a bifurcarse y alejarse del camino continuo podrás estar relacionado con el hecho de que el panel B sea menos resistente.

### 7.3 Efecto del proceso de lijado y pulido

Por último, en la observación tanto de las fotocomposiciones como de las micrografías se observó que las grietas de las muestras ensayadas al 80% parecían más profundas que las del resto de muestras. En las Figuras 7- 227 y 7-228 se comparan como se visualizan las grietas para muestras ensayadas al 80% y el 90% de la carga de rotura, respectivamente, apreciándose la mayor profundidad de la muestra al 80%. En las Figuras 7-229 y 7-230 se han adjuntado las microgrfías correspondientes a las grietas de espesor máximas observadas al 80% y al 90% de carga respectivamente. Dichas imágenes se han adjuntado sin ningún tipo de tratamiento a la imagen para comparar como se visualiza el daño en cada muestra a simple vista de microscopio. Se ve que, al igual que a x25, la grieta parece más profunda y además el espesor máximo de la grieta a través de las fibras es mayor.

Aunque las muestras expuestas se corresponden con el panel B, la muestras del panel A presentan el mismo efecto. El hecho de que las muestras al 80% y al 50% sean las que se han sometido a un mayor número de ciclos de lijado y pulido hizo surgir la duda de si el efecto de mayor profundidad de grieta podría estar relacionado con la secuencia de pulido, ya sea bien porque al quitar planos del material se inspecciona una zona más central con respecto al ancho de la probeta y el daño aquí sea mayor, o bien con el hecho de que se introduzca algún tipo de daño en el lijado y pulido, se elimine demasiado material y las grietas presenten una mayor profundidad en planos interiores o el proceso abra los labios de la grieta.

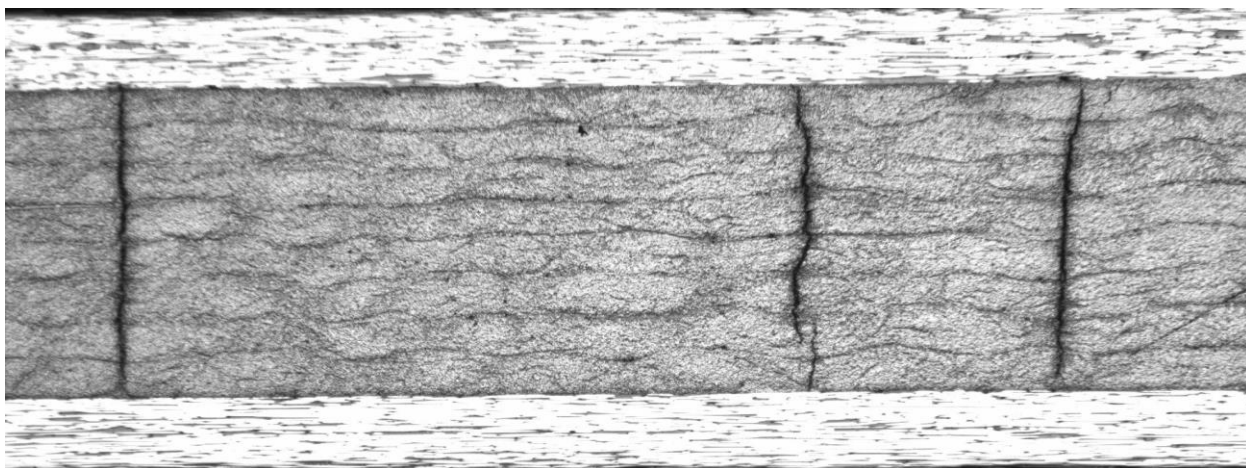


Figura 7-227. Fragmento de la muestra 7B, observada a x25.

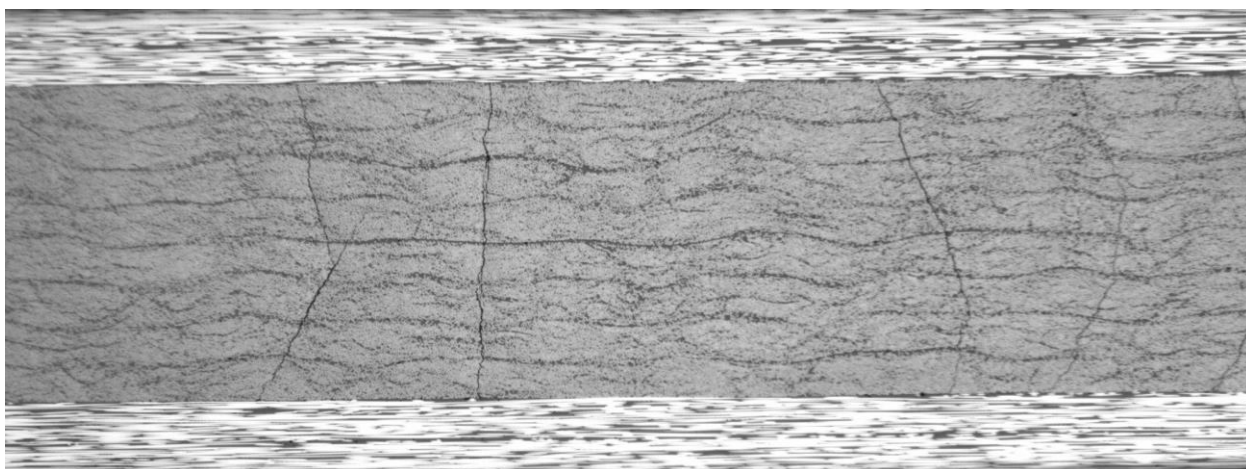


Figura 7-228. Fragmento de la muestra 25B, observada a x25.

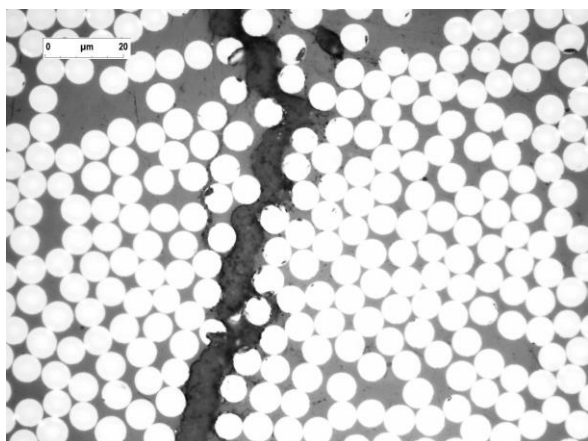


Figura 7-229. Fragmento de grieta de la muestra 7B, observada a x1000.

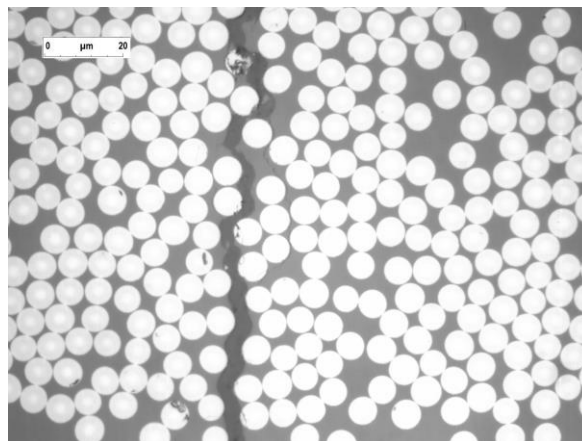


Figura 7-230. Fragmento de grieta de la muestra 25B, observada a x1000.

Con el objetivo de estudiar el posible efecto del pulido en las muestras se ha sometida una de ellas, en específico la muestra 25B, a un proceso de 5 de secuencias de lijado y pulido, y se ha observado a distintos aumentos. Cada una de las secuencias de lijado y pulido han sido:

Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3		
Tiempo	Presión	Velocidad	Tiempo	Presión	Velocidad	Tiempo	Presión	Velocidad
3 min	35 N	80 u/min	3 min	35 N	80 u/min	3 min	35 N	80 u/min
6 min	35 N	80 u/min	6 min	35 N	80 u/min	6 min	35 N	80 u/min
-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 - 5 min	25 N	80 u/min	5 - 5 min	25 N	80 u/min	5 - 5 min	25 N	80 u/min

Ciclo 4			Ciclo 5		
Tiempo	Presión	Velocidad	Tiempo	Presión	Velocidad
3 min	35 N	80 u/min	3 min	50 N	80 u/min
6 min	35 N	80 u/min	6 min	35 N	80 u/min
-	-	-	-	-	-
5 - 5 min	25 N	80 u/min	5 - 5 min	25 N	80 u/min

Tabla 7-3. Ciclos de pulido llevados a cabos en la probeta 25B en el análisis del pulido.

Las variaciones observadas de un pulido a otro han sido bastante considerables, apareciendo y desapareciendo formas de daño en cada paso. Para detallar los resultados se procede exponiendo las diferencias encontradas de menor a mayor aumento empleados al recorrer la muestra.

Comparando a x50, en la grieta contabilizada como grieta 12 del trozo 2 de la fotocomposición de la muestra a 25B, al pasar del cuarto pulido al quinto se dan variaciones apreciables: se da que la grieta bifurca donde antes no bifurcaba y que su recorrido varía ligeramente, algo que se comprueba si se incrementa el número de aumentos.



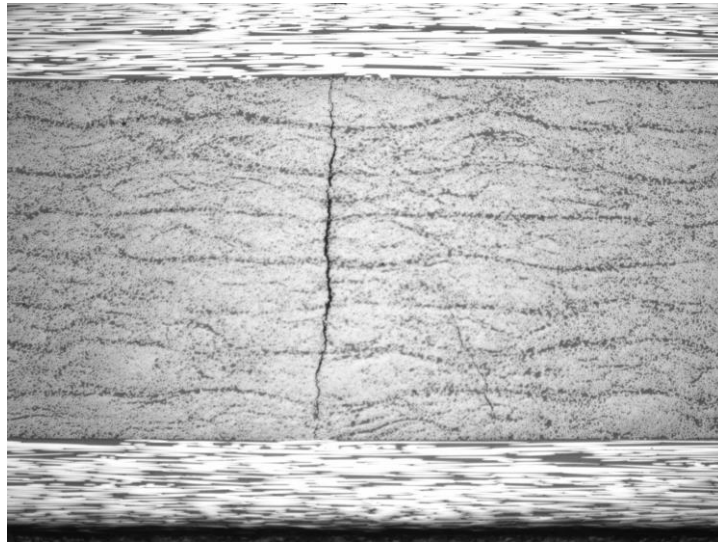


Figura 7-231. Grieta 12 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x50.

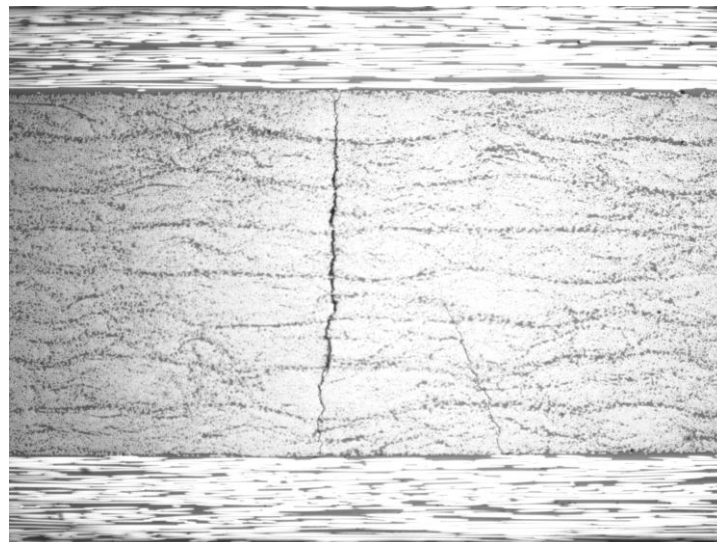


Figura 7-232. Grieta 12 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x50.

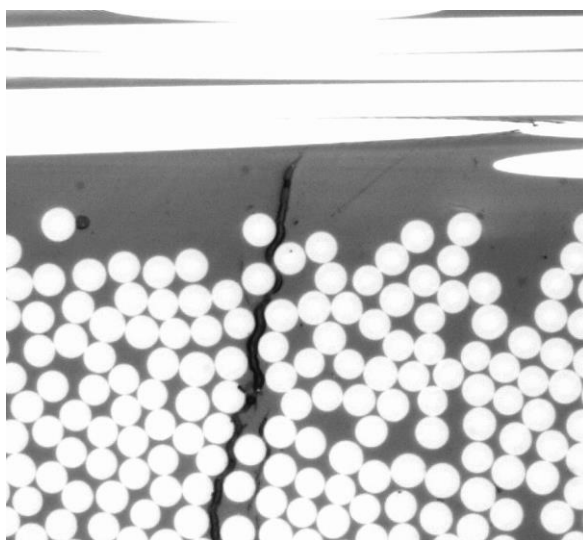


Figura 7-233. Grieta 12 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x500.

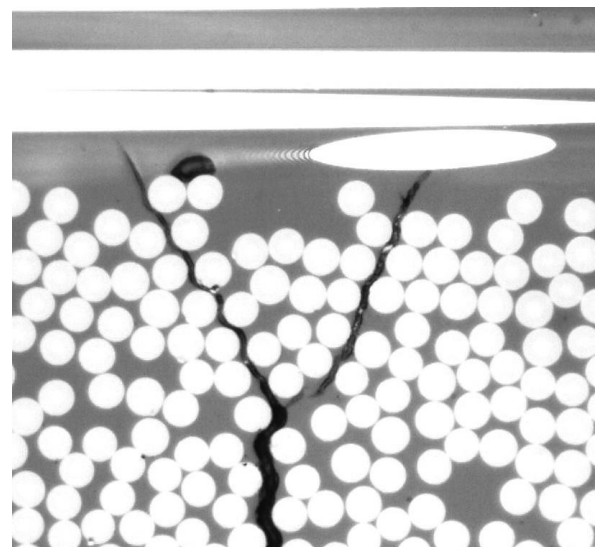


Figura 7-234. Grieta 12 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x500.

En cuanto al espesor de las grietas se ha observado que sí es un factor de influencia, aumentando estas conforme se realizan pulidos. Estos es observable en las Figuras 7-235 a 7-238, donde también se puede ver que con los pulidos acaba apareciendo una delaminación que provoca la rotura de las láminas a  $0^\circ$ , lo que es un indicador de que el hecho de no haber realizado la misma secuencia de pulidos en todas las muestras ha podido ocasionar una cierta distorsión de los resultados obtenidos.

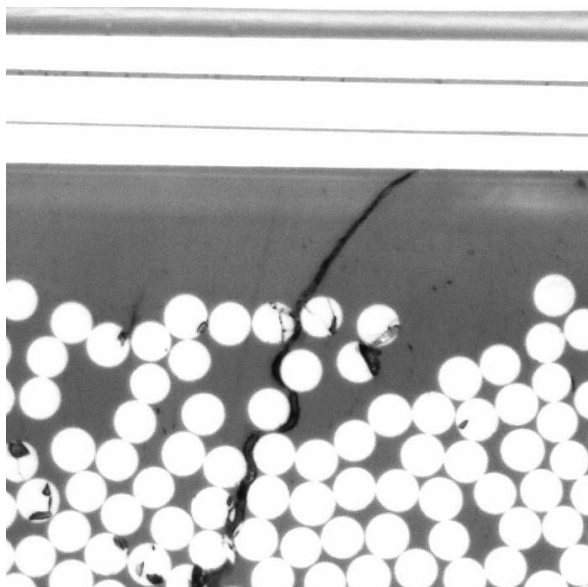


Figura 7-235. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 2, observada a x500.

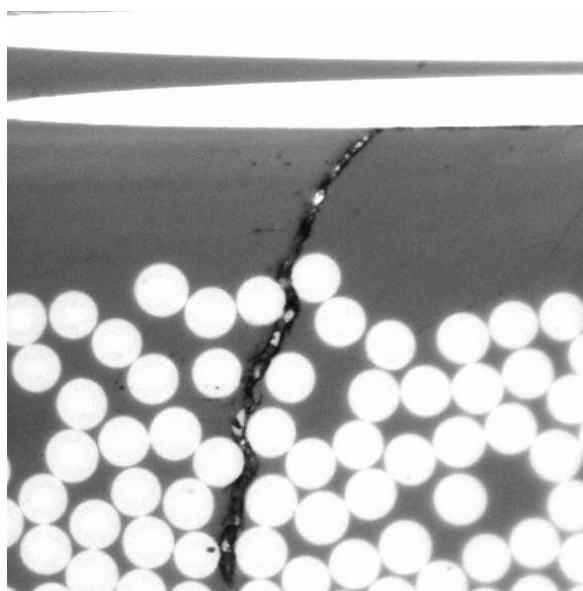


Figura 7-236. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 3, observada a x500.

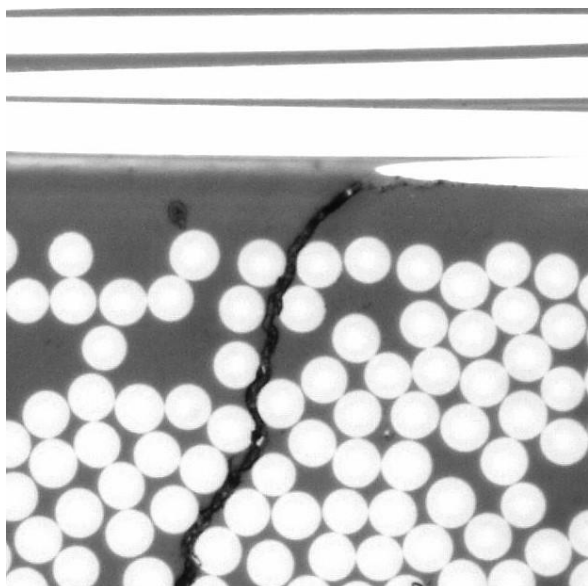


Figura 7-237. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x500.

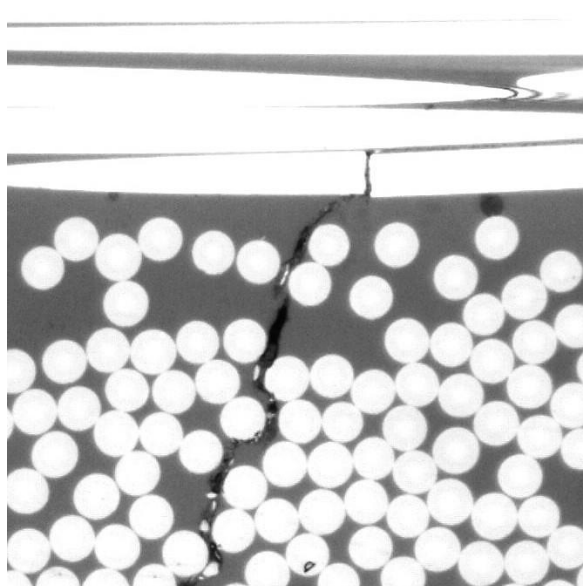


Figura 7-238. Grieta 9 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x500.

No se da siempre que conforme se aumente el número de pulidos aparezca un mayor nivel de daño, si no que en el análisis realizado se han observado casos en los que un defecto desaparece. Un ejemplo de esto se ha encontrado en la grieta 13 del trozo de la fotocomposición, donde una grieta que no termina al lado de una macrogrieta ha terminado desapareciendo, tal y como se aprecia en las Figuras 7-239 a 7-343.



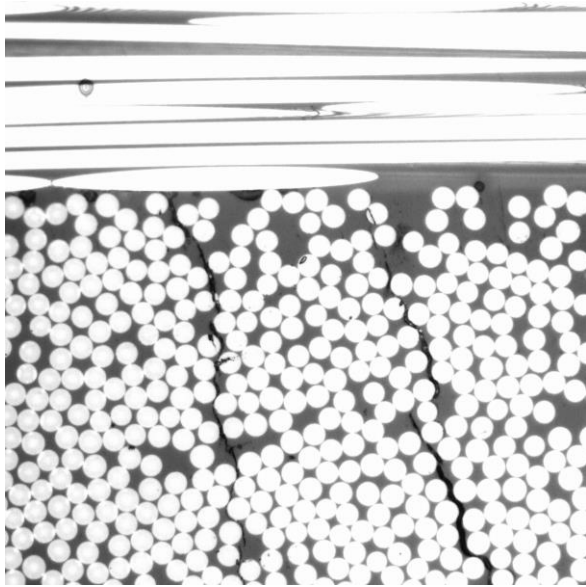


Figura 7-239. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 2, observada a x500.

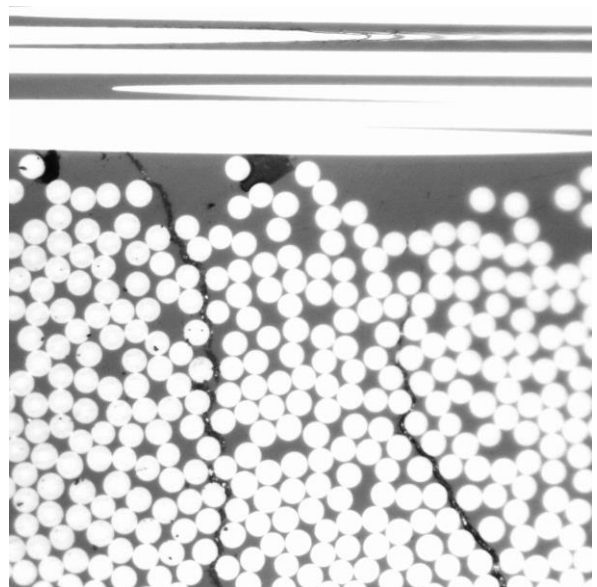


Figura 7-240. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 3, observada a x500.

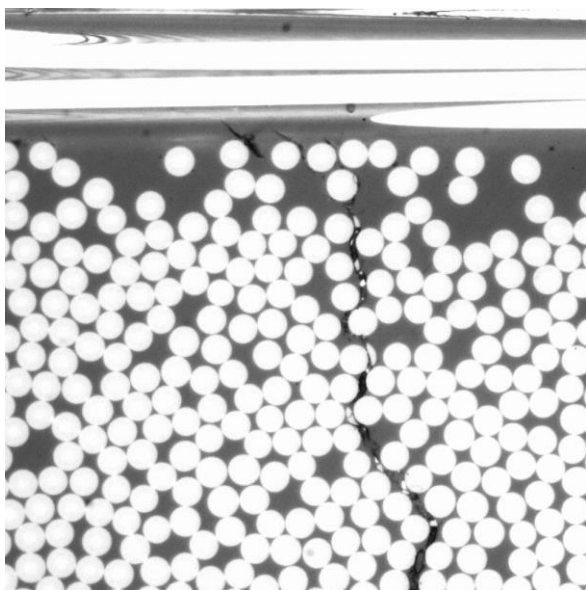


Figura 7-241. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x500.

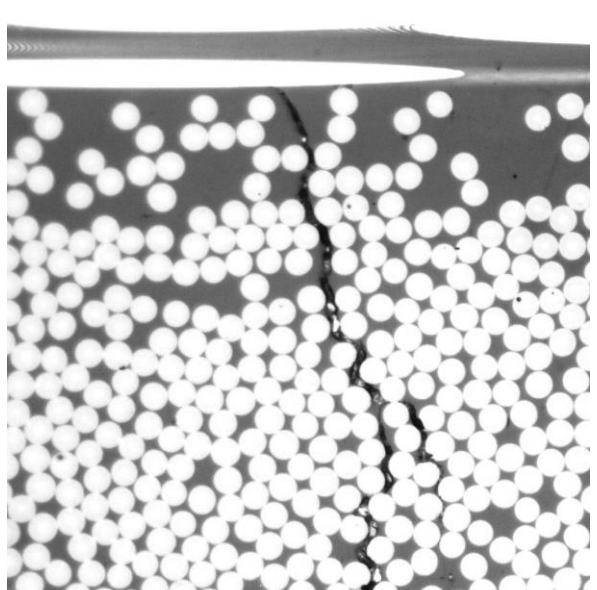


Figura 7-242. Grieta 13 del trozo 2 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x500.

En la grieta 1 del trozo 3 de la fotocomposición realizada para esta muestra, se aprecia uno de los defectos catalogados como una heterogeneidad en la sección anterior, lo cual constituye una referencia para ver si se produce algún tipo de cambio de un pulido al siguiente.

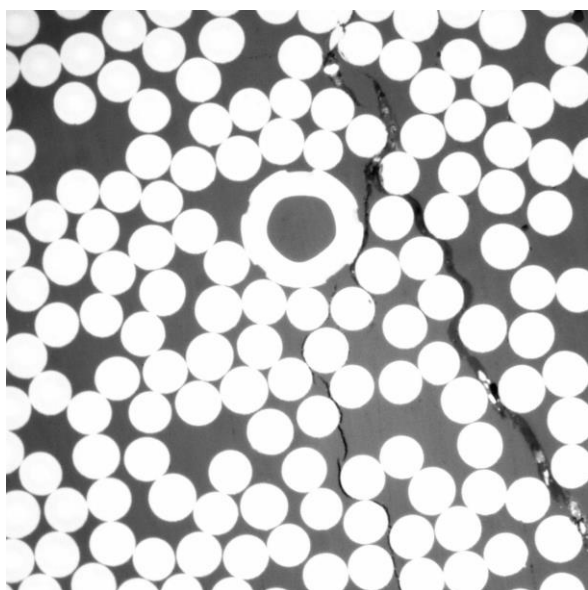


Figura 7-243. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 1, observada a x1000.

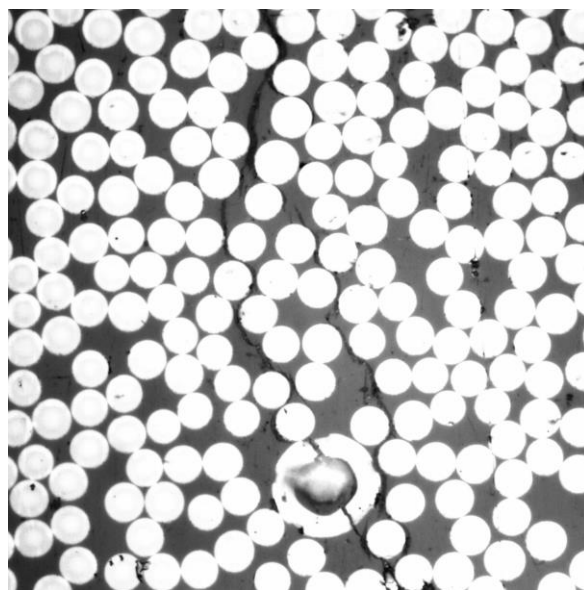


Figura 7-244. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 2, observada a x1000.

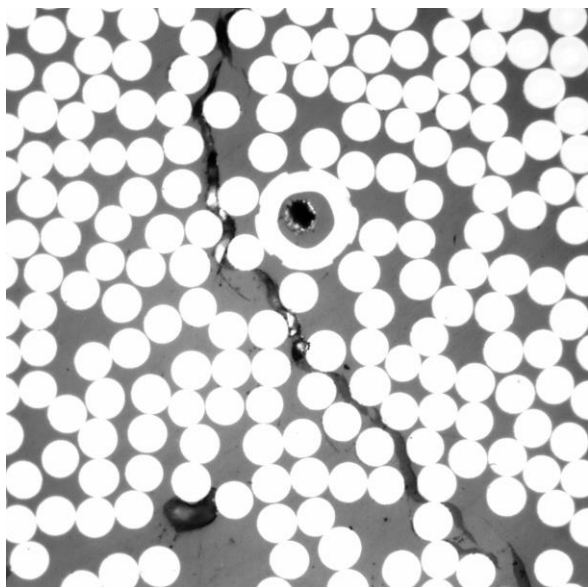


Figura 7-245. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 3, observada a x1000.

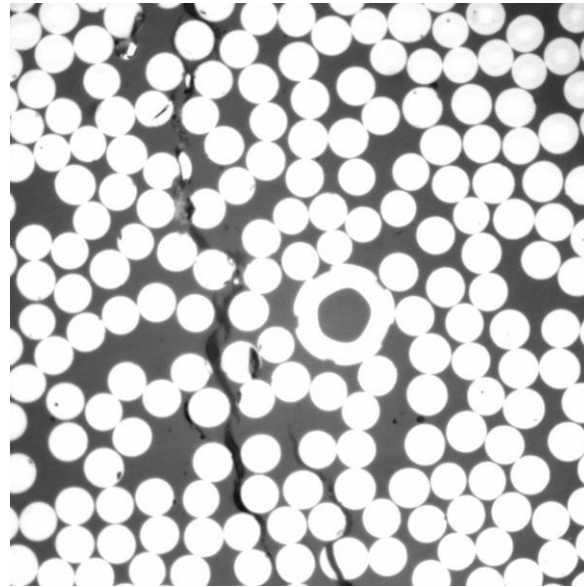


Figura 7-246. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 4, observada a x1000.

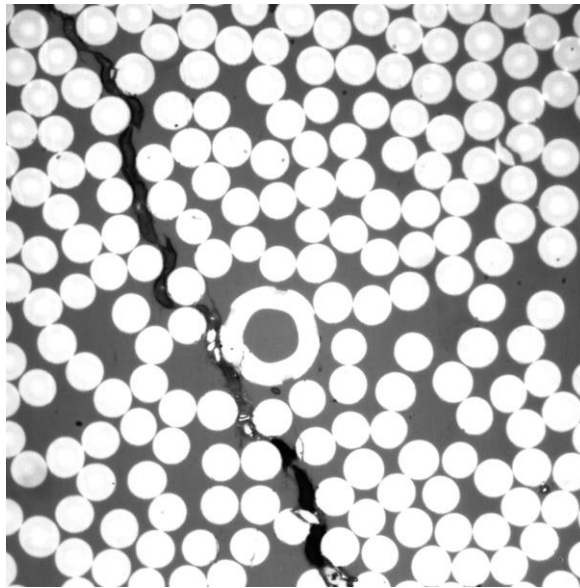


Figura 7-247. Grieta 1 del trozo 3 de la muestra 25B, en el ciclo 5, observada a x1000.

Se observa, al igual que en el resto de casos, que el comportamiento varía mucho con el paso de los pulidos. Además, se aprecia como varía la densidad y distribución de la fibra, algo que no debería de pasar pues la matriz debería aglutinar la fibra perfectamente. Además, estas variaciones no se producen únicamente en las fibras a  $90^\circ$  si no que también se aprecian en las de  $0^\circ$ , lo cual es indicador de que al lijar se pueda estar eliminando demasiado material.



## 8 CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS

Tal y como se comentó en el capítulo introductorio, el objetivo del presente proyecto es ahondar en el llamado efecto escala. Para ello, se ha realizado un estudio experimental de los mecanismos de iniciación y evolución del daño asociado al fallo de la matriz en laminados de material compuesto sometidos a cargas estáticas de tracción en dos laminados multidireccionales, con láminas a  $90^\circ$  y a  $0^\circ$ , de tal forma que únicamente se diferencian en el espesor de la sección de las láminas a  $90^\circ$ , siendo la secuencia de apilado de cada uno de ellos  $[0_2, 90_2]_S$  y  $[0_2, 90_4]_S$ .

Para ello se ha procedido a la fabricación de ambos laminados y obtención de probetas para su posterior ensayo.

Se han realizado dos tipos de ensayo: ensayos hasta la rotura del material, lo que ha permitido la comparación entre los laminados a escala macromecánica, y ensayos a un porcentaje menor de la carga de rotura experimentalmente calculada.

Para realizar el análisis micromecánico del daño se ha procedido a la preparación de muestras para la observación en un microscopio óptico y al barrido de estas a diferentes aumentos.

El primer tipo de ensayos realizados, es decir, ensayos hasta la carga de rotura, permitió obtener la resistencia de cada laminado. Los valores obtenidos para cada laminado han sido de 585.15 MPa para el panel grueso y de 870.85 MPa para el panel delgado. Es decir, el panel B es un 33% menos resistente que el panel A, existiendo variación en la resistencia del laminado con la variación del espesor de la sección de las láminas a  $90^\circ$ , lo cual permite concluir que en el estudio realizado se aprecia algún tipo de efecto escala.

El análisis del daño en las muestras ensayadas a cargas menores de la rotura se ha dividido en dos escalas: escala meso, correspondiente a observaciones a x25, y escala micro, a un mayor número de aumentos que van desde x200 a x1000.

La escala meso ha permitido la visualización de macrogrietas y la consecuente determinación de su densidad en cada una de las muestras ensayadas, así como un estudio cualitativo de las distintas tendencias que presentan.

En el estudio de la densidad de grietas se observa que la primera grieta transversal aparece para un 40% de la carga de rotura en el panel A, y para un 50% en el panel B.

En cuanto a valor máximo de grietas por centímetro en cada panel, sucede que en el panel A la densidad máxima observada (correspondiente al 90% de la tensión de rotura) es mayor que en el panel B (con un valor 1.5 veces superior). Sin embargo, la primera grieta transversal aparece para un nivel de tensión más bajo en el panel B siendo los niveles de tensión correspondientes 292.6 MPa frente a 348.35 MPa, y la densidad de grietas para un mismo nivel de tensión es en todo momento superior en el panel B. Es decir, el daño se inicia antes en el panel grueso y crece con una pendiente similar, pero no llega a alcanzar la densidad de grietas máxima que presenta el panel delgado simplemente porque rompe a un nivel de tensión menor.

Una vez determinada la densidad de grietas transversales se realizó una clasificación de las macrogrietas según distintas tendencias observadas en la fotocomposición. La clasificación se corresponde con: grietas rectas, grietas oblicuas, grietas discontinuas y grietas incompletas.

En cuanto a la primera distinción realizada, es decir, entre grietas rectas y grietas oblicuas, se aprecian diferencias importantes entre ambos laminados. Mientras que en el panel grueso (B) conforme aumenta el nivel de tensión aplicada se aprecia una tendencia en las grietas de desviarse del camino perpendicular a la aplicación de la carga nombrando a este tipo de grietas como grietas oblicuas este tipo de daño no se da en el panel delgado (A).

En el estudio estadístico realizado para este tipo de defecto en el panel B se ha observado que la tendencia de las grietas a desviarse se da para altos niveles de carga, en torno al 70%, y que a partir de su aparición crecen con una pendiente elevada, llegando a alcanzarse un crecimiento similar al de grietas rectas. Además, se aprecia en

este tipo de grietas una tendencia a aparecer cerca de una grieta transversal con tendencia a acercarse al daño. Es decir, analizando su forma desde los extremos hacia la parte central, se observa cómo la grieta se curva para acercarse a una grieta transversal cercana.

Diferenciadas las grietas transversales en rectas y desviadas el siguiente paso llevó a la determinación del porcentaje de estas grietas discontinuas, en un intento de relacionar la mayor resistencia del panel A con un mayor porcentaje de este tipo de grietas y con el hecho de que al existir aún un nexo de matriz entre dos o más fragmentos de grieta se diera esta.

La identificación de grietas discontinuas, es decir, formadas por dos segmentos de macrogrieta que no han unido completamente sino que se mantiene un nexo de matriz entre ambos, se planteó en un primer momento porque en el análisis de las micrografías a x25 parecía haber un mayor número de estas en el panel A que en el panel B, lo que llevó a plantear que esto pudiera estar relacionado con la mayor resistencia del laminado. Sin embargo, al realizar un barrido de las muestras a un mayor número de aumentos y determinar la densidad de grietas discontinuas se ha observado que este tipo de grietas no siguen ningún patrón de crecimiento completo: no se aprecia una relación entre la densidad de grietas discontinuas y el nivel de tensión aplicado, ni una tendencia clara a aparecer en mayor proporción en ninguno de los laminados. Existen porcentajes de carga en los que se han contabilizado más grietas incompletas por centímetro en el panel A y viceversa.

Hecho el análisis de las grietas transversales se pasa al estudio de grietas incompletas, es decir, aquellas grietas transversales que no recorren la sección de las láminas a  $90^\circ$  completamente. Se ha apreciado que estas grietas aparecen una proporción mucho mayor en las zona cercana de las láminas a  $0^\circ$  que en la sección central y que la densidad de este tipo de defecto es mayor en el panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ , para cada nivel de carga, que en el panel A,  $[0_2, 90_2]_S$ , llegando a ser unas 8.5 veces mayor.

Una vez determinada la densidad de grietas y, su clasificación, se procedió al estudio del daño a escala micro. A esta escala se han buscado delaminaciones, despegues aislados en distinta etapa de crecimiento (Fase I y Fase II), microgrietas (Fase III) [2] o bifurcaciones de la grieta en distintos segmentos.

Se comenzó con el estudio de las delaminaciones, observando que aunque en ambos laminados aparecen para un 50% de la carga de rotura la densidad de este defecto alcanza un valor mucho mayor en el panel B que en el panel A, llegando a ser hasta unas 43 veces mayor. Es decir, mientras que en el panel A aparecen de forma esporádica, en el panel B es un efecto bastante importante a tener en cuenta.

En el estudio de despegues aislados en sus fases I y II y lo que en el presente trabajo se ha nombrado como microgrietas (fase III), que en realidad son macrogrietas de pequeño recorrido, se ha observado que no aparecen hasta que no aparece la primera grieta transversal, al 40%. Además, a niveles de carga mayor, estos daños aparecen siempre en la zona adyacente a una grieta transversal y no de forma aislada.

En cuanto a la tendencia seguida por una grieta transversal en su recorrido de extremo a extremo de la sección se ve que mientras que las grietas del panel A tienden a presentar un camino continuo, sin segmentos de grieta que aparezcan unidos a la grieta transversal y se bifurquen en la dirección de aplicación de la carga, en el panel B se aprecia un alto porcentaje de grietas con esta tendencia. Además, las distancias máximas alcanzadas por estos segmentos de grieta respecto a la grieta principal son mayores en el panel B.

Es decir, en el panel B se aprecia una mayor apertura del daño en la dirección de aplicación de la carga, lo que junto con la mayor densidad de delaminaciones y de grietas incompletas puede estar relacionado con su menor resistencia.

Por último, comentar que la comparación entre muestras que han sido sometidas a diferentes ciclos de lijado y pulido trajo consigo el estudio de este efecto. De la comparación de como se visualizan un limitado número de grietas a lo largo de los ciclos realizados se concluye que el proceso de lijado puede afectar a los resultados obtenidos, pues se ha comprobado que de una imagen a otra tomada después de ciclos de lijado consecutivos pueden aparecer delaminaciones o desaparecer microgrietas, además de cambiar parámetros que priori deberían

permanecer intactos como la distribución de fibra. Esto hace necesaria una investigación futura más profunda.

Dicho esto, el presente trabajo deja varias líneas de investigación abiertas que sienten la base de trabajos posteriores:

- Fabricación de un laminado con factor de escala intermedio ( $n=3$ ), es decir, con secuencia de apilado  $[0_2, 90_3]_S$ , en el que se puedan estudiar los factores que diferencian a ambos laminados, es decir, la alta diferencia en la densidad de delaminaciones, la existencia de grietas desviadas o la tendencia de las grietas a bifurcarse,
- El posible efecto del lijado necesario para la preparación de las muestras a inspeccionar sobre el daño sufrido por las probetas. Para facilitar el proceso se aconseja iniciar el estudio en probetas ensayadas a bajos niveles de carga de manera que cuenten con una baja densidad de macrogrietas que eviten la confusión entre grietas cercanas.





---

## REFERENCIAS

---

- [1] París F., Cañas J., Marín , J. C. Marín y Barroso A., Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos, Sevilla: Sección de Publicaciones. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad de Sevilla.
- [2] Correa A., París F. y Mantic V., «Kinking of Transversal Interface Cracks Between Fiber and Matrix,» *Journal of Applied Mechanics*, pp. vol 72, pp. 703-716, 2007.
- [3] Yang L., Yan Y., Liu Y. y Ran Z., «Microscopic failure mechanisms of fiber-reinforced polymer composites under transverse tension and compression» *Composites Science and Technology*, vol. 72, pp. 1818-1825, 2012.
- [4] Blázquez A., París F., Mantic V. y McCartney L., «Stress state characterization of delamination cracks in [0,90] symmetric laminates by BEM,» *ELSEVIER*, p. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/ijsolstr](http://www.elsevier.com/locate/ijsolstr), 2007.
- [5] AENOR, «Material aeroespacial, Plásticos reforzados con fibra de carbono, Estratificados unidireccionales, ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra,» Norma Española, 1996.
- [6] Airbus, «IPS Individual Product Specification, Carbon fibre Reinforced Epoxy Prepreg Undirectional Tape/ 180 °C Curing Standard Modulus Fibre, IPS05-01-001-03,» 2016.
- [7] Jalaivand M., Wisnom M. R., Hosseini-Toudeshky H. y Mohammadi B., «Experimental and numerical study of oblique transverse cracking in cross-ply laminates under tension,» *El Sevier*, p. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/composites](http://www.elsevier.com/locate/composites), 2014.
- [8] Garg A., «A damage mode in composite structures,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 29, p. 557–584, 1988.



# ANEXO A

Este anexo contiene las medidas realizadas a cada uno de las probetas objeto de análisis en el presente proyecto. Se han realizado medidas de espesor de la sección (h), ancho de la sección (b), longitud del "span", es decir, de la longitud libre, y de los "tabs". Todas las medidas aquí recogidas están en milímetros.

## 1. Panel A, $[0_2, 90_2]_S$

### 1.1 Probetas ensayadas hasta la rotura

Probeta 1A		
	15.07	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.95	14.98
	14.94	
	1.53	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.53	1.53
	1.53	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.25	
<b>tab2(derecho)</b>	61.64	
<b>span</b>	156.13	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.02	

Tabla 0-1. Dimensiones probeta 1A.

Probeta 2A		
	15.02	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.98	15
	15.01	
	1.55	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.53	1.53
	1.50	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.31	
<b>tab2(derecho)</b>	62.1	
<b>span</b>	155.25	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.66	

Tabla 0-2. Dimensiones probeta 2A.

Probeta 3A		
	14.59	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.77	14.77
	14.96	
	1.56	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.57	1.55
	1.53	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.12	
<b>tab2(derecho)</b>	62.58	
<b>span</b>	155.71	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.41	

Tabla 0-3. Dimensiones probeta 3A.

Probeta 4A		
	15.01	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.97	15.02
	15.07	
	1.55	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.53	1.55
	1.56	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.25	
<b>tab2(derecho)</b>	62.27	
<b>span</b>	155.74	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.26	

Tabla 0-4. Dimensiones probeta 4A.

Probeta 5A		
	14.91	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.92	14.94
	14.99	
	1.55	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.52	1.55
	1.59	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.55	
<b>tab2(derecho)</b>	61.88	
<b>Span</b>	155.75	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.18	

Tabla 0-5. Dimensiones de la probeta 5A.

## 1.2 Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura

Probeta 25A		
	14.96	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.8	14.76
	14.53	
	1.47	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.48	1.49
	1.51	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.44	
<b>tab2(derecho)</b>	62.74	
<b>Span</b>	156.51	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.69	

Tabla 0-6. Dimensiones de la probeta 25A.



Figura 0-1. Probeta del panel A ensayadas al 90% de su carga de rotura.

## 1.3 Probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura

Probeta 6A		
	14.97	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.95	14.96
	14.98	
	1.54	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.55	1.55
	1.54	
	60.13	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.13	
<b>tab2(derecho)</b>	61.18	
<b>span</b>	156.9	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.21	

Tabla 0-7. Dimensiones probeta 6A.

Probeta 7A		
	14.99	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.93	14.96
	14.93	
	1.53	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.53	1.52
	1.51	
	60.55	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.55	
<b>tab2(derecho)</b>	61.79	
<b>span</b>	155.6	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.94	

Tabla 0-8. Dimensiones probeta 7A.

Probeta 8A		
	14.96	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15	14.98
	14.97	
	1.52	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.55	1.53
	1.52	
	60.18	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.18	
<b>tab2(derecho)</b>	61.68	
<b>span</b>	155.86	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.72	

Tabla 0-9. Dimensiones probeta 8A.

Probeta 9A		
	15	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.97	14.97
	14.96	
	1.51	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.52	1.53
	1.54	
	60.65	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.65	
<b>tab2(derecho)</b>	61.06	
<b>span</b>	156.77	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.48	

Tabla 0-10. Dimensiones probeta 9A.

Probeta 10A		
	14.55	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.57	14.54
	14.50	
	1.52	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.54	1.53
	1.54	
	60.67	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.67	
<b>tab2(derecho)</b>	60.71	
<b>span</b>	157.38	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.76	

Tabla 0-11. Dimensiones de la probeta 10A.

### 1.4 Probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura

Probeta 20A		
	14.96	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.03	15.02
	15.07	
	1.52	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.53	1.54
	1.56	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.48	
<b>tab2(derecho)</b>	61.89	
<b>span</b>	155.49	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.86	

Tabla 0-12. Dimensiones probeta 20A.

Probeta 24A		
	15	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.94	15
	15.01	
	1.48	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.54	1.52
	1.54	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.59	
<b>tab2(derecho)</b>	61.77	
<b>span</b>	155.84	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.76	

Tabla0-13. Dimensiones probeta 24A.



Figura 0-2. Probetas del panel A ensayadas al 70% de su carga de rotura

### 1.5 Probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura

Probeta 21A		
	14.97	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.02	15.01
	15.04	
	1.55	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.54	1.53
	1.50	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.97	
<b>tab2(derecho)</b>	62.36	
<b>span</b>	155.93	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.26	

Tabla 0-14. Dimensiones probeta 21A.

Probeta 22A		
	15.13	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.01	15.04
	14.98	
	1.56	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.52	1.54
	1.57	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.35	
<b>tab2(derecho)</b>	61.45	
<b>span</b>	155.95	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.75	

Tabla 0-15. Dimensiones probeta 22A



Figura 0-3. Probetas del panel A ensayadas al 60% de su carga de rotura

**1.6 Probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura**

Probeta 11A		
	15	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15	15.01
	15.03	
	1.53	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.54	1.54
	1.55	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.69	
<b>tab2(derecho)</b>	60.7	
<b>span</b>	155.62	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.01	

Tabla 0-16. Dimensiones probeta 11A.

Probeta 12A		
	15.03	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.04	15.026
	15.01	
	1.54	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.54	1.55
	1.56	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.3	
<b>tab2(derecho)</b>	62.11	
<b>span</b>	155.15	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.56	

Tabla 0-17. Dimensiones probeta 12A

Probeta 13A		
	15	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.97	15
	15.02	
	1.55	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.54	1.55
	1.56	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.31	
<b>tab2(derecho)</b>	61.48	
<b>span</b>	155.91	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.7	

Tabla 0-18. Dimensiones probeta 13A.

Probeta 14A		
	14.98	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.97	14.98
	14.97	
	1.55	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.54	1.55
	1.53	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.26	
<b>tab2(derecho)</b>	61.15	
<b>span</b>	156.76	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.17	

Tabla 0-19. Dimensiones probeta 14A

Probeta 15A		
	15.01	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.04	15.02
	15.01	
	1.53	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.55	1.55
	1.55	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.93	
<b>tab2(derecho)</b>	61.53	
<b>span</b>	156.57	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.03	

Tabla 0-20. Dimensiones de la probeta 15A.

### 1.7 Probetas ensayadas al 40% de la carga de rotura

Probeta 18A		
	15.05	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.02	15.05
	15.07	
	1.59	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.59	1.59
	1.6	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.85	
<b>tab2(derecho)</b>	61.66	
<b>span</b>	155.92	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.43	

Tabla 0-21. Dimensiones probeta 18A.

Probeta 19A		
	14.97	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15	15.01
	15.06	
	1.56	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.50	1.53
	1.52	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.95	
<b>tab2(derecho)</b>	61.04	
<b>span</b>	155.48	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.47	

Tabla 0-22. Dimensiones probeta 19A



Figura 0-4. Probetas del panel A ensayadas al 40% de su carga de rotura

### 1.1 Probetas ensayadas al 30% de la carga de rotura

Probeta 16A		
	15.1	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.93	14.91
	14.89	
	1.62	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.55	1.57
	1.55	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.51	
<b>tab2(derecho)</b>	61.56	
<b>span</b>	155.93	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279	

Tabla 0-23. Dimensiones probeta 16A.

Probeta 17A		
	14.79	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.89	14.89
	15.02	
	1.55	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	1.52	1.54
	1.56	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.86	
<b>tab2(derecho)</b>	60.98	
<b>span</b>	155.88	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.72	

Tabla 0-24. Dimensiones probeta 17A



Figura 0-5. Probetas del panel A ensayadas al 30% de su carga de rotura



2. Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ 

## 2.1 Probetas ensayadas hasta la rotura

Probeta 1B		
	13.98	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.94	14.64
	15.02	
	2.18	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.20	2.20
	2.20	
	2.20	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.96	
<b>tab2(derecho)</b>	63.66	
<b>span</b>	155.79	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.41	

Tabla 0-25. Dimensiones probeta 1B.

Probeta 2B		
	15.03	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.97	15
	14.99	
	2.26	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.24	2.28
	2.35	
	2.35	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.35	
<b>tab2(derecho)</b>	64.41	
<b>span</b>	155.9	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	281.66	

Tabla 0-26. Dimensiones probeta 2B

Probeta 3B		
	14.71	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.84	14.85
	15	
	2.24	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.25	2.26
	2.28	
	2.28	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.47	
<b>tab2(derecho)</b>	63.27	
<b>span</b>	155.04	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.78	

Tabla 0-27. Dimensiones probeta 3B.

Probeta 4B		
	14.99	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.94	14.97
	14.97	
	2.27	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.27	2.27
	2.28	
	2.28	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.67	
<b>tab2(derecho)</b>	63.91	
<b>span</b>	155.26	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.84	

Tabla 0-28. Dimensiones probeta 4B

Probeta 5B		
	15.07	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.07	15.07
	15.05	
	2.39	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.27	2.35
	2.41	
	2.41	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.78	
<b>tab2(derecho)</b>	63.29	
<b>Span</b>	155.03	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.1	

Tabla 0-29. Dimensiones de la probeta 5B.

## 2.2 Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura

Probeta 25B		
	14.98	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.96	14.97
	14.97	
	2.33	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.37	2.34
	2.32	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.09	
<b>tab2(derecho)</b>	61.93	
<b>Span</b>	156.22	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.24	

Tabla 0-30. Dimensiones de la probeta 25B.



Figura 0-6. Probeta del panel B ensayadas al 90% de su carga de rotura

## 2.3 Probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura

Probeta 6B		
	14.99	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.01	15.02
	15.06	
	2.26	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.26	2.26
	2.25	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.91	
<b>tab2(derecho)</b>	63.53	
<b>span</b>	155.49	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.93	

Tabla 0-31. Dimensiones probeta 6B.

Probeta 7B		
	14.91	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.93	14.95
	15	
	2.27	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.25	2.26
	2.27	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.57	
<b>tab2(derecho)</b>	63.54	
<b>span</b>	155.02	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.13	

Tabla 0-32. Dimensiones probeta 7B.

Probeta 8B		
	15.07	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.03	15.04
	15.02	
	2.23	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.25	2.24
	2.24	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.36	
<b>tab2(derecho)</b>	63.31	
<b>span</b>	155.11	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.78	

Tabla 0-33. Dimensiones probeta 8B.

Probeta 9B		
	14.91	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.98	15.01
	15.11	
	2.23	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.25	2.25
	2.26	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.67	
<b>tab2(derecho)</b>	62.97	
<b>span</b>	155.33	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.97	

Tabla 0-34. Dimensiones probeta 9B.

Probeta 10B		
	14.94	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.94	14.83
	14.72	
	2.26	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.25	2.26
	2.27	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.94	
<b>tab2(derecho)</b>	63.55	
<b>span</b>	155.31	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.8	

Tabla 0-35. Dimensiones de la probeta 9B.

## 2.4 Probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura

Probeta 23B		
	14.82	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.98	14.96
	15.09	
	2.33	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.33	2.33
	2.32	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.56	
<b>tab2(derecho)</b>	61.66	
<b>span</b>	154.63	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	277.85	

Tabla 0-36. Dimensiones probeta 23B.

Probeta 24B		
	14.94	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.81	14.83
	14.74	
	2.33	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.32	2.32
	2.32	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.9	
<b>tab2(derecho)</b>	61.96	
<b>span</b>	155.43	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.29	

Tabla 0-37. Dimensiones probeta 24B.



Figura 0-7. Probetas del panel B ensayadas al 70% de su carga de rotura

## 2.5 Probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura

Probeta 21B		
	15.02	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.05	15.06
	15.12	
	2.34	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.32	2.33
	2.33	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.7	
<b>tab2(derecho)</b>	61.94	
<b>span</b>	155.6	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.24	

Tabla 0-38. Dimensiones probeta 21B.

Probeta 22B		
	15.13	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.97	15
	14.91	
	2.32	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.31	2.33
	2.35	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.96	
<b>tab2(derecho)</b>	62.01	
<b>span</b>	155.8	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.77	

Tabla 0-39. Dimensiones probeta 22B.



Figura 0-8. Probetas del panel B ensayadas al 60% de su carga de rotura

## 2.6 Probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura

Probeta 11B		
	15.15	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.03	15.077
	15.05	
	2.27	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.26	2.26
	2.26	
<b>tab1(izquierdo)</b>	62.01	
<b>tab2(derecho)</b>	62.77	
<b>span</b>	155.68	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.46	

Tabla 0-40. Dimensiones probeta 11B.

Probeta 12B		
	15.11	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.06	15.08
	15.08	
	2.27	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.26	2.26
	2.25	
<b>tab1(izquierdo)</b>	62.21	
<b>tab2(derecho)</b>	63.05	
<b>span</b>	154.52	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.78	

Tabla 0-41. Dimensiones probeta 12B.

Probeta 13B		
	15.04	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.98	15.013
	15.02	
	2.26	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.26	2.26
	2.27	
<b>tab1(izquierdo)</b>	62.18	
<b>tab2(derecho)</b>	62.40	
<b>span</b>	155.96	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	280.54	

Tabla 0-42. Dimensiones probeta 13B.

Probeta 14B		
	15.05	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.98	15
	14.97	
	2.27	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.23	2.25
	2.26	
<b>tab1(izquierdo)</b>	62.07	
<b>tab2(derecho)</b>	62.71	
<b>span</b>	154.14	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	278.92	

Tabla 0-43. Dimensiones probeta 14B

Probeta 15B		
	14.89	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.64	14.677
	14.47	
	2.25	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.26	2.26
	2.28	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.82	
<b>tab2(derecho)</b>	62.84	
<b>span</b>	154.9	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.56	

Tabla 0-44. Dimensiones de la probeta 15B.

## 2.7 Probetas ensayadas al 40% de la carga de rotura

Probeta 18B		
	15.17	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.16	15.12
	15.03	
	2.32	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.3	2.3
	2.29	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.86	
<b>tab2(derecho)</b>	62.22	
<b>span</b>	156.37	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.45	

Tabla 0-45. Dimensiones probeta 11B.

Probeta 19B		
	15.04	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	15.03	15.04
	15.05	
	2.28	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.27	2.27
	2.26	
<b>tab1(izquierdo)</b>	60.99	
<b>tab2(derecho)</b>	62.02	
<b>span</b>	156.49	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.5	

Tabla 0-46. Dimensiones probeta 12B



Figura 0-9. Probetas del panel B ensayadas al 40% de su carga de rotura

2.8 Probetas ensayadas al 30% de la carga de rotura

Probeta 16B		
	15.1	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.99	14.98
	14.95	
	2.33	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.24	2.33
	2.43	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.62	
<b>tab2(derecho)</b>	61.89	
<b>span</b>	156.45	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.96	

Tabla 0-47. Dimensiones probeta 16B.

Probeta 17B		
	14.97	<b>b</b>
<b>b (ancho)</b>	14.95	15.01
	15.11	
	2.28	<b>h</b>
<b>h(espesor)</b>	2.28	2.27
	2.25	
<b>tab1(izquierdo)</b>	61.03	
<b>tab2(derecho)</b>	62.53	
<b>span</b>	156.38	
<b>l (span+tab1+tab2)</b>	279.84	

Tabla 0-48. Dimensiones probeta 17B



Figura 0-10. Probetas del panel B ensayadas al 30% de su carga de rotura

## ANEXO B

En el presente Anexo se recogen los pasos seguidos en la determinación de grietas transversales en cada una de las muestras ensayadas de ambos laminados. Se procede para ello exponiendo la longitud de cada trozo, empleando para ello la nomenclatura  $L_{T\_n^\circ \text{ del trozo en la fotocomposición}}$ , así como la total; el número de grietas contadas en cada trozo, nombradas como  $n_{T\_n^\circ \text{ del trozo en la fotocomposición}}$ , así como el número total; y las propiedades observadas hasta el momento: fuerza y tensión máxima a la que ha sido sometida la probeta, porcentaje de esta tensión máxima respecto a la tensión de rotura media calculada para este laminado, módulo elástico y densidad de grietas, expresada en número de grietas por micrometro y por centímetro.

### 3. Panel A, $[0_2, 90_2]_5$

#### 3.1 Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura

Muestra 25A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	24923.74	$n_{T1}$	18	$F_{m\acute{a}x}(N)$	17236.17
$L_{T2}(\mu m)$	26059.33	$n_{T2}$	20	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	783.73
$L_{T3}(\mu m)$	26765.79	$n_{T3}$	21	%X (%)	89.996
$L_{T4}(\mu m)$	26299.45	$n_{T4}$	22	E(GPa)	71.85
$L_{TOTAL}(\mu m)$	104048.31	$n_{TOTAL}$	81	n° de grietas por $\mu m$	$7.78 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	10.4	$n_{TOTAL}$	81	n° de grietas por cm	7.78

Tabla 0-1. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 25A.

#### 3.2 Probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura

Muestra 6A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	37090.59	$n_{T1}$	21	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15852.6
$L_{T2}(\mu m)$	37319.48	$n_{T2}$	28	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	683.61
$L_{T3}(\mu m)$	37342.81	$n_{T3}$	20	%X (%)	78.5
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	72.75
$L_{TOTAL}(\mu m)$	111752.88	$n_{TOTAL}$	69	n° de grietas por $\mu m$	$6.17 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	11.12	$n_{TOTAL}$	69	n° de grietas por cm	6.17

Tabla 0-2. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 6A.

Muestra 7A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	37406.8	$n_{T1}$	22	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15617.52
$L_{T2}(\mu m)$	36833.35	$n_{T2}$	23	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	687.39
$L_{T3}(\mu m)$	35118.66	$n_{T3}$	25	%X (%)	78.93
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	70.86
$L_{TOTAL}(\mu m)$	109358.81	$n_{TOTAL}$	70	n° de grietas por $\mu m$	$6.4 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	10.94	$n_{TOTAL}$	70	n° de grietas por cm	6.4

Tabla 0-3. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 7A.

Muestra 8A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	32460.47	$n_{T1}$	20	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15902.01
$L_{T2}(\mu m)$	33839	$n_{T2}$	24	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	694.11
$L_{T3}(\mu m)$	33392.67	$n_{T3}$	21	%X (%)	79.7
$L_{T4}(\mu m)$	30870.07	$n_{T4}$	20	E(GPa)	74.16
$L_{TOTAL}(\mu m)$	130562.21	$n_{TOTAL}$	85	n° de grietas por $\mu m$	$6.51 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.06	$n_{TOTAL}$	85	n° de grietas por cm	6.51

Tabla 0-4. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 8A.

Muestra 9A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	34108.46	$n_{T1}$	22	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15931.44
$L_{T2}(\mu m)$	32686.66	$n_{T2}$	18	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	695.7
$L_{T3}(\mu m)$	32662.97	$n_{T3}$	18	%X (%)	79.89
$L_{T4}(\mu m)$	36789.16	$n_{T4}$	19	E(GPa)	71.53
$L_{TOTAL}(\mu m)$	136247.25	$n_{TOTAL}$	77	n° de grietas por $\mu m$	$5.65 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.62	$n_{TOTAL}$	77	n° de grietas por cm	5.65

Tabla 0-5. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 9A.



Muestra 10A				
Longitud		n° de grietas		Propiedades
$L_{T1}(\mu m)$	30302.27	$n_{T1}$	15	$F_{m\acute{a}x}(N)$ 16098.21
$L_{T2}(\mu m)$	31220.35	$n_{T2}$	18	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$ 723.51
$L_{T3}(\mu m)$	34581.94	$n_{T3}$	18	%X (%) 83.08
$L_{T4}(\mu m)$	31005.66	$n_{T4}$	16	E(GPa) 76.29
$L_{TOTAL}(\mu m)$	127110.22	$n_{TOTAL}$	67	n° de grietas por $\mu m$ $5.27 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	12.71	$n_{TOTAL}$	67	n° de grietas por cm 5.27

Tabla 0-6. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 10A.

### 3.3 Probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura

Muestra 20A				
Longitud		n° de grietas		Propiedades
$L_{T1}(\mu m)$	20226	$n_{T1}$	8	$F_{m\acute{a}x}(N)$ 14096.97
$L_{T2}(\mu m)$	19344.64	$n_{T2}$	8	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$ 609.47
$L_{T3}(\mu m)$	22203.4	$n_{T3}$	11	%X (%) 69.98
$L_{T4}(\mu m)$	22163.85	$n_{T4}$	12	E(GPa) 69.49
$L_{TOTAL}(\mu m)$	83937.89	$n_{TOTAL}$	39	n° de grietas por $\mu m$ $4.65 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	8.3	$n_{TOTAL}$	39	n° de grietas por cm 4.65

Tabla 0-7. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 20A.

Muestra 24A				
Longitud		n° de grietas		Propiedades
$L_{T1}(\mu m)$	21282.5	$n_{T1}$	12	$F_{m\acute{a}x}(N)$ 16098.21
$L_{T2}(\mu m)$	21279.67	$n_{T2}$	11	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$ 611.4
$L_{T3}(\mu m)$	20437.6	$n_{T3}$	12	%X (%) 70.2
$L_{T4}(\mu m)$	20203.4	$n_{T4}$	10	E(GPa) 70
$L_{TOTAL}(\mu m)$	83203.17	$n_{TOTAL}$	45	n° de grietas por $\mu m$ $5.41 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	8.32	$n_{TOTAL}$	45	n° de grietas por cm 5.41

Tabla 0-8. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 24A.

## 3.4 Probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura

Muestra 21A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	21104.53	$n_{T1}$	9	$F_{m\acute{a}x}(N)$	12713.76
$L_{T2}(\mu m)$	21118.65	$n_{T2}$	9	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	553.73
$L_{T3}(\mu m)$	21129.95	$n_{T3}$	8	%X (%)	63.58
$L_{T4}(\mu m)$	21129.95	$n_{T4}$	10	E(GPa)	73.53
$L_{TOTAL}(\mu m)$	84483.08	$n_{TOTAL}$	36	n° de grietas por $\mu m$	$4.26 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	8.45	$n_{TOTAL}$	36	n° de grietas por cm	4.26

Tabla 0-9. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 21A.

Muestra 22A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	24909.62	$n_{T1}$	8	$F_{m\acute{a}x}(N)$	12184.02
$L_{T2}(\mu m)$	23474.59	$n_{T2}$	3	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	522.65
$L_{T3}(\mu m)$	22663.85	$n_{T3}$	5	%X (%)	60.01
$L_{T4}(\mu m)$	23581.93	$n_{T4}$	6	E(GPa)	66.54
$L_{TOTAL}(\mu m)$	94629.99	$n_{TOTAL}$	22	n° de grietas por $\mu m$	$2.325 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	9.46	$n_{TOTAL}$	22	n° de grietas por cm	2.325

Tabla 0-10. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 22A.

## 1.5 Probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura

Muestra 11A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	36714.71	$n_{T1}$	1	$F_{m\acute{a}x}(N)$	9839.43
$L_{T2}(\mu m)$	36398.32	$n_{T2}$	1	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	425.76
$L_{T3}(\mu m)$	36375.72	$n_{T3}$	0	%X (%)	48.89
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	70.69
$L_{TOTAL}(\mu m)$	109488.78	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por $\mu m$	$1.83 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	10.95	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por cm	0.183

Tabla 0-11. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 11A.

Muestra 12A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	32898.32	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	9868.86
$L_{T2}(\mu m)$	32898.32	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	423.74
$L_{T3}(\mu m)$	32898.32	$n_{T3}$	3	%X (%)	48.66
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	64.78
$L_{TOTAL}(\mu m)$	98694.96	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por $\mu m$	$3.04 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	9.87	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por cm	0.304

Tabla 0-12. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 12A.

Muestra 13A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	30324.87	$n_{T1}$	3	$F_{m\acute{a}x}(N)$	10143.54
$L_{T2}(\mu m)$	32839	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	436.28
$L_{T3}(\mu m)$	30593.23	$n_{T3}$	0	%X (%)	50.1
$L_{T4}(\mu m)$	35872.9	$n_{T4}$	0	E(GPa)	72.8
$L_{TOTAL}(\mu m)$	129630	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por $\mu m$	$2.31 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	12.96	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por cm	0.231

Tabla 0-13. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 13A.

Muestra 14A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	31121.48	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	10025.82
$L_{T2}(\mu m)$	30903.97	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	434.58
$L_{T3}(\mu m)$	33403.97	$n_{T3}$	1	%X (%)	49.9
$L_{T4}(\mu m)$	35398.32	$n_{T4}$	1	E(GPa)	63.71
$L_{TOTAL}(\mu m)$	130827.74	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por $\mu m$	$1.53 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.08	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por cm	0.153

Tabla 0-14. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 14A.

Muestra 15A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	33556.51	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	10163.16
$L_{T2}(\mu m)$	32531.09	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	436.56
$L_{T3}(\mu m)$	34644.09	$n_{T3}$	0	%X (%)	50.13
$L_{T4}(\mu m)$	31974.59	$n_{T4}$	0	E(GPa)	77.6
$L_{TOTAL}(\mu m)$	132706.28	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	13.27	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-15. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 15A.

## 1.1 Probetas ensayadas al 40% de la carga de rotura

Muestra 18A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	30844.65	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	8370.87
$L_{T2}(\mu m)$	30864.422	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	349.81
$L_{T3}(\mu m)$	28146.906	$n_{T3}$	0	%X (%)	40.17
$L_{T4}(\mu m)$	29279.676	$n_{T4}$	0	E(GPa)	63.7
$L_{TOTAL}(\mu m)$	119135.654	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	11.91	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-16. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 18A.

Muestra 19A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	24909.62	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	8014.77
$L_{T2}(\mu m)$	23474.59	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	349.07
$L_{T3}(\mu m)$	22663.85	$n_{T3}$	0	%X (%)	40.08
$L_{T4}(\mu m)$	23581.93	$n_{T4}$	1	E(GPa)	67.14
$L_{TOTAL}(\mu m)$	94629.99	$n_{TOTAL}$	1	n° de grietas por $\mu m$	$1.06 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	9.46	$n_{TOTAL}$	1	n° de grietas por cm	0.106

Tabla 0-17. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 19A.

## 1.1 Probetas ensayadas al 30% de la carga de rotura

Muestra 16A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	30858.77	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	6194.03
$L_{T2}(\mu m)$	31274.03	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	263.58
$L_{T3}(\mu m)$	29683.63	$n_{T3}$	0	%X (%)	30.27
$L_{T4}(\mu m)$	31686.46	$n_{T4}$	0	E(GPa)	72.53
$L_{TOTAL}(\mu m)$	123502.89	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	12.35	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-18. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 16A.

Muestra 17A					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	29293.81	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	6000.78
$L_{T2}(\mu m)$	29590.41	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	261.7
$L_{T3}(\mu m)$	29759.90	$n_{T3}$	0	%X (%)	30.05
$L_{T4}(\mu m)$	30149.73	$n_{T4}$	0	E(GPa)	69.27
$L_{TOTAL}(\mu m)$	118793.82	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	11.88	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-19. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 17A.

2. Panel B,  $[0_2, 90_4]_S$ 

## 2.1 Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura

Muestra 25B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	24166.68	$n_{T1}$	16	$F_{m\acute{a}x}(N)$	17236.17
$L_{T2}(\mu m)$	17107.35	$n_{T2}$	11	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	783.73
$L_{T3}(\mu m)$	26932.22	$n_{T3}$	15	%X (%)	89.996
$L_{T4}(\mu m)$	27293.8	$n_{T4}$	15	E(GPa)	71.85
$L_{TOTAL}(\mu m)$	95500.05	$n_{TOTAL}$	57	n° de grietas por $\mu m$	$5.97 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	9.55	$n_{TOTAL}$	57	n° de grietas por cm	5.97

Tabla 0-20, Densidad de grietas y propiedades de la muestra 25B.

## 2.2 Probetas ensayadas al 80% de la carga de rotura

Muestra 6B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	35556.52	$n_{T1}$	11	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15833.34
$L_{T2}(\mu m)$	36248.61	$n_{T2}$	14	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	466.51
$L_{T3}(\mu m)$	36384.2	$n_{T3}$	14	%X (%)	79.72
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	47.34
$L_{TOTAL}(\mu m)$	108189.33	$n_{TOTAL}$	39	n° de grietas por $\mu m$	$3.6 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	10.82	$n_{TOTAL}$	39	n° de grietas por cm	3.6

Tabla 0-21. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 6B.

Muestra 7B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	36214.71	$n_{T1}$	17	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15892.2
$L_{T2}(\mu m)$	36313.58	$n_{T2}$	13	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	470.32
$L_{T3}(\mu m)$	36991.54	$n_{T3}$	14	%X (%)	80.37
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	51.76
$L_{TOTAL}(\mu m)$	109519.83	$n_{TOTAL}$	44	n° de grietas por $\mu m$	$4.02 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	10.95	$n_{TOTAL}$	44	n° de grietas por cm	4.02

Tabla 0-22. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 7B.

Muestra 8B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	34528.27	$n_{T1}$	14	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15774.48
$L_{T2}(\mu m)$	33644.08	$n_{T2}$	14	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	468.22
$L_{T3}(\mu m)$	31180.81	$n_{T3}$	11	%X (%)	80.02
$L_{T4}(\mu m)$	33166.68	$n_{T4}$	13	E(GPa)	48.76
$L_{TOTAL}(\mu m)$	132519.84	$n_{TOTAL}$	52	n° de grietas por $\mu m$	$3.92 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.25	$n_{TOTAL}$	52	n° de grietas por cm	3.92

Tabla 0-23. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 8B.

Muestra 9B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	34426.57	$n_{T1}$	13	$F_{m\acute{a}x}(N)$	15833.34
$L_{T2}(\mu m)$	31844.65	$n_{T2}$	15	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	468.86
$L_{T3}(\mu m)$	34553.69	$n_{T3}$	14	%X (%)	80.13
$L_{T4}(\mu m)$	30522.61	$n_{T4}$	11	E(GPa)	48.78
$L_{TOTAL}(\mu m)$	131347.52	$n_{TOTAL}$	53	n° de grietas por $\mu m$	$4.035 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.13	$n_{TOTAL}$	53	n° de grietas por cm	4.035

Tabla 0-24. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 9B.



Muestra 10B				
Longitud		n° de grietas		Propiedades
$L_{T1}(\mu m)$	32881.37	$n_{T1}$	13	$F_{m\acute{a}x}(N)$ 15725.43
$L_{T2}(\mu m)$	34728.83	$n_{T2}$	12	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$ 469.14
$L_{T3}(\mu m)$	31313.57	$n_{T3}$	12	%X (%) 80.17
$L_{T4}(\mu m)$	32183.63	$n_{T4}$	12	E(GPa) 47.22
$L_{TOTAL}(\mu m)$	131107.4	$n_{TOTAL}$	49	n° de grietas por $\mu m$ $3.86 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.11	$n_{TOTAL}$	49	n° de grietas por cm 3.86

Tabla 0-25. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 10B.

## 2.3 Probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura

Muestra 23B				
Longitud		n° de grietas		Propiedades
$L_{T1}(\mu m)$	21364.42	$n_{T1}$	7	$F_{m\acute{a}x}(N)$ 14204.88
$L_{T2}(\mu m)$	21573.46	$n_{T2}$	7	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$ 407.48
$L_{T3}(\mu m)$	22646.9	$n_{T3}$	8	%X (%) 69.64
$L_{T4}(\mu m)$	22678.15	$n_{T4}$	7	E(GPa) 49.4
$L_{TOTAL}(\mu m)$	88262.93	$n_{TOTAL}$	29	n° de grietas por $\mu m$ $3.28 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	8.82	$n_{TOTAL}$	29	n° de grietas por cm 3.28

Tabla 0-26. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 23B.

Muestra 24B				
Longitud		n° de grietas		Propiedades
$L_{T1}(\mu m)$	21884.19	$n_{T1}$	8	$F_{m\acute{a}x}(N)$ 14106.78
$L_{T2}(\mu m)$	21799.45	$n_{T2}$	8	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$ 410.08
$L_{T3}(\mu m)$	22564.98	$n_{T3}$	8	%X (%) 70.08
$L_{T4}(\mu m)$	22370.07	$n_{T4}$	8	E(GPa) 51.6
$L_{TOTAL}(\mu m)$	88618.69	$n_{TOTAL}$	32	n° de grietas por $\mu m$ $3.45 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	8.86	$n_{TOTAL}$	32	n° de grietas por cm 3.45

Tabla 0-27. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 24B.

## 2.3 Probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura

Muestra 21B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	23022.61	$n_{T1}$	3	$F_{m\acute{a}x}(N)$	12360.6
$L_{T2}(\mu m)$	23028.87	$n_{T2}$	4	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	352.25
$L_{T3}(\mu m)$	22090.41	$n_{T3}$	6	%X (%)	60.02
$L_{T4}(\mu m)$	22485.89	$n_{T4}$	2	E(GPa)	47.72
$L_{TOTAL}(\mu m)$	90627.78	$n_{TOTAL}$	15	n° de grietas por $\mu m$	$1.655 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	9.06	$n_{TOTAL}$	15	n° de grietas por cm	1.655

Tabla 0-28. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 21B.

Muestra 22B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	19228.82	$n_{T1}$	3	$F_{m\acute{a}x}(N)$	12223.26
$L_{T2}(\mu m)$	19508.48	$n_{T2}$	3	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	349.74
$L_{T3}(\mu m)$	21745.77	$n_{T3}$	2	%X (%)	59.77
$L_{T4}(\mu m)$	21158.2	$n_{T4}$	4	E(GPa)	46.41
$L_{TOTAL}(\mu m)$	81641.27	$n_{TOTAL}$	12	n° de grietas por $\mu m$	$1.47 \cdot 10^{-4}$
$L_{TOTAL}(cm)$	8.16	$n_{TOTAL}$	12	n° de grietas por cm	1.47

Tabla 0-29. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 22B.

## 2.4 Probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura

Muestra 11B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	33087.59	$n_{T1}$	1	$F_{m\acute{a}x}(N)$	9839.43
$L_{T2}(\mu m)$	33087.64	$n_{T2}$	2	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	288.8
$L_{T3}(\mu m)$	32985.89	$n_{T3}$	0	%X (%)	49.35
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	50.7
$L_{TOTAL}(\mu m)$	99161.12	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por $\mu m$	$3.02 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	9.91	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por cm	0.302

Tabla 0-30. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 11B.

Muestra 12B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	35372.9	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	9898.29
$L_{T2}(\mu m)$	35415.27	$n_{T2}$	2	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	290.44
$L_{T3}(\mu m)$	35968.95	$n_{T3}$	0	%X (%)	49.63
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{T4}$	0	E(GPa)	52.45
$L_{TOTAL}(\mu m)$	106757.12	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por $\mu m$	$1.87 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	10.67	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por cm	0.187

Tabla 0-31. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 12B.

Muestra 13B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	30420.92	$n_{T1}$	1	$F_{m\acute{a}x}(N)$	9839.43
$L_{T2}(\mu m)$	28471.77	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	289.99
$L_{T3}(\mu m)$	30364.42	$n_{T3}$	1	%X (%)	49.56
$L_{T4}(\mu m)$	29081.94	$n_{T4}$	0	E(GPa)	46.57
$L_{TOTAL}(\mu m)$	118339.05	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por $\mu m$	$1.69 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	11.83	$n_{TOTAL}$	2	n° de grietas por cm	0.169

Tabla 0-32. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 13B.

Muestra 14B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	34621.48	$n_{T1}$	1	$F_{m\acute{a}x}(N)$	9849.24
$L_{T2}(\mu m)$	34132.79	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	291.83
$L_{T3}(\mu m)$	34514.14	$n_{T3}$	2	%X (%)	49.87
$L_{T4}(\mu m)$	34833.35	$n_{T4}$	0	E(GPa)	50.84
$L_{TOTAL}(\mu m)$	138101.76	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por $\mu m$	$2.17 \cdot 10^{-5}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.81	$n_{TOTAL}$	3	n° de grietas por cm	0.217

Tabla 0-33. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 14B.

Muestra 15B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	33138.43	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	9917.91
$L_{T2}(\mu m)$	33765.55	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	299.18
$L_{T3}(\mu m)$	33706.23	$n_{T3}$	1	%X (%)	48.41
$L_{T4}(\mu m)$	33265.55	$n_{T4}$	0	E(GPa)	51.12
$L_{TOTAL}(\mu m)$	133875.76	$n_{TOTAL}$	1	n° de grietas por $\mu m$	$7.47 \cdot 10^{-6}$
$L_{TOTAL}(cm)$	13.39	$n_{TOTAL}$	1	n° de grietas por cm	0.0747

Tabla 0-34. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 15B.

## 2.5 Probetas ensayadas al 40% de la carga de rotura

Muestra 18B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	26019.787	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	8216.86
$L_{T2}(\mu m)$	26889.844	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	236.25
$L_{T3}(\mu m)$	26889.844	$n_{T3}$	0	%X (%)	40.37
$L_{T4}(\mu m)$	26889.844	$n_{T4}$	0	E(GPa)	48.82
$L_{TOTAL}(\mu m)$	106689.319	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	10.67	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-35. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 18B.

Muestra 19B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	31833.348	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	8022.62
$L_{T2}(\mu m)$	31093.234	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	234.99
$L_{T3}(\mu m)$	31542.389	$n_{T3}$	0	%X (%)	40.16
$L_{T4}(\mu m)$	32016.965	$n_{T4}$	0	E(GPa)	49.64
$L_{TOTAL}(\mu m)$	126485.94	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	12.65	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-36. Densidad de grietas y propiedades de la muestra 19B.

## 1.1 Probetas ensayadas al 30% de la carga de rotura

Muestra 16B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	31437.87	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	6131.25
$L_{T2}(\mu m)$	30887.02	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	175.68
$L_{T3}(\mu m)$	32045.21	$n_{T3}$	0	%X (%)	30.02
$L_{T4}(\mu m)$	30745.78	$n_{T4}$	0	E(GPa)	48.67
$L_{TOTAL}(\mu m)$	12511.88	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	12.51	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-37. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 16B.

Muestra 17B					
Longitud		n° de grietas		Propiedades	
$L_{T1}(\mu m)$	30689.28	$n_{T1}$	0	$F_{m\acute{a}x}(N)$	5989
$L_{T2}(\mu m)$	34144.08	$n_{T2}$	0	$\sigma_{m\acute{a}x}(MPa)$	175.78
$L_{T3}(\mu m)$	32288.15	$n_{T3}$	0	%X (%)	30.04
$L_{T4}(\mu m)$	30822.05	$n_{T4}$	0	E(GPa)	51.42
$L_{TOTAL}(\mu m)$	127943.56	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por $\mu m$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	12.79	$n_{TOTAL}$	0	n° de grietas por cm	0

Tabla 0-38. Densidad de grietas y propiedades para la muestra 17B.

# ANEXO C

En el presente Anexo se recogen los pasos seguidos en la determinación de grietas rectas y desviadas en cada una de las muestras ensayadas del panel B, donde existe esta diferenciación. Se procede para ello exponiendo la longitud de cada trozo, empleando para ello la nomenclatura  $L_{T\_n^\circ \text{ del trozo en la fotocomposición}}$ , así como la total; el número de grietas rectas contadas en cada trozo, nombradas como  $n_{R\_n^\circ \text{ del trozo en la fotocomposición}}$ , así como el número total y el número de grietas desviadas contadas en cada trozo, nombradas como  $n_{D\_n^\circ \text{ del trozo en la fotocomposición}}$ , así como el número total.

## 1. Panel B, $[0_2, 90_4]_S$

### 1.1 Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura

Muestra 25B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	24166.68	$n_{R1}$	8	$n_{D1}$	8
$L_{T2}(\mu m)$	17107.35	$n_{R2}$	7	$n_{D2}$	4
$L_{T3}(\mu m)$	26932.22	$n_{R3}$	12	$n_{D3}$	3
$L_{T4}(\mu m)$	27293.8	$n_{R4}$	12	$n_{D4}$	3
$L_{TOTAL}(\mu m)$	95500.05	$n_{R_{TOTAL}}$	39	$n_{D_{TOTAL}}$	19
$L_{TOTAL}(cm)$	9.55	Grietas por cm	5.97	Grietas por cm	1.88

Tabla 0-1. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 25B.

### 1.2 Probetas ensayadas al 90% de la carga de rotura

Muestra 6B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	35556.52	$n_{R1}$	12	$n_{D1}$	2
$L_{T2}(\mu m)$	36248.61	$n_{R2}$	12	$n_{D2}$	2
$L_{T3}(\mu m)$	36384.2	$n_{R3}$	11	$n_{D3}$	3
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	108189.33	$n_{R_{TOTAL}}$	35	$n_{D_{TOTAL}}$	7
$L_{TOTAL}(cm)$	10.82	Grietas por cm	3.23	Grietas por cm	0.65

Tabla 0-2. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 6B.

Muestra 7B				
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas
$L_{T1}(\mu m)$	36214.71	$n_{R1}$	15	$n_{D1}$ 2
$L_{T2}(\mu m)$	36313.58	$n_{R2}$	12	$n_{D2}$ 1
$L_{T3}(\mu m)$	36991.54	$n_{R3}$	11	$n_{D3}$ 3
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$ 0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	109519.83	$n_{RTOTAL}$	38	$n_{DTOTAL}$ 6
$L_{TOTAL}(cm)$	10.95	Grietas por cm	3.47	Grietas por cm 0.55

Tabla 0-3. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 7B.

Muestra 8B				
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas
$L_{T1}(\mu m)$	34528.27	$n_{R1}$	9	$n_{D1}$ 5
$L_{T2}(\mu m)$	33644.08	$n_{R2}$	11	$n_{D2}$ 3
$L_{T3}(\mu m)$	31180.81	$n_{R3}$	10	$n_{D3}$ 1
$L_{T4}(\mu m)$	33166.68	$n_{R4}$	9	$n_{D4}$ 4
$L_{TOTAL}(\mu m)$	132519.84	$n_{RTOTAL}$	39	$n_{DTOTAL}$ 13
$L_{TOTAL}(cm)$	13.25	Grietas por cm	3.27	Grietas por cm 0.98

Tabla 0-4. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 8B.

Muestra 9B				
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas
$L_{T1}(\mu m)$	34426.57	$n_{R1}$	10	$n_{D1}$ 3
$L_{T2}(\mu m)$	31844.65	$n_{R2}$	13	$n_{D2}$ 2
$L_{T3}(\mu m)$	34553.69	$n_{R3}$	12	$n_{D3}$ 2
$L_{T4}(\mu m)$	30522.61	$n_{R4}$	8	$n_{D4}$ 3
$L_{TOTAL}(\mu m)$	131347.52	$n_{RTOTAL}$	43	$n_{DTOTAL}$ 10
$L_{TOTAL}(cm)$	13.13	Grietas por cm	2.74	Grietas por cm 0.76

Tabla 0-5. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 9B.



Muestra 10B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	32881.37	$n_{R1}$	9	$n_{D1}$	4
$L_{T2}(\mu m)$	34728.83	$n_{R2}$	11	$n_{D2}$	1
$L_{T3}(\mu m)$	31313.57	$n_{R3}$	8	$n_{D3}$	4
$L_{T4}(\mu m)$	32183.63	$n_{R4}$	8	$n_{D4}$	4
$L_{TOTAL}(\mu m)$	131107.4	$n_{R_{TOTAL}}$	36	$n_{D_{TOTAL}}$	13
$L_{TOTAL}(cm)$	13.11	Grietas por cm	2.75	Grietas por cm	0.99

Tabla 0-6. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 10B

## 1.3 Probetas ensayadas al 70% de la carga de rotura

Muestra 23B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	21364.42	$n_{R1}$	7	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	21573.46	$n_{R2}$	7	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	22646.9	$n_{R3}$	7	$n_{D3}$	1
$L_{T4}(\mu m)$	22678.15	$n_{R4}$	6	$n_{D4}$	1
$L_{TOTAL}(\mu m)$	88262.93	$n_{R_{TOTAL}}$	27	$n_{D_{TOTAL}}$	2
$L_{TOTAL}(cm)$	8.82	Grietas por cm	3.06	Grietas por cm	0.23

Tabla 0-7. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 23B.

Muestra 24B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	21884.19	$n_{R1}$	7	$n_{D1}$	1
$L_{T2}(\mu m)$	21799.45	$n_{R2}$	6	$n_{D2}$	2
$L_{T3}(\mu m)$	22564.98	$n_{R3}$	7	$n_{D3}$	1
$L_{T4}(\mu m)$	22370.07	$n_{R4}$	8	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	88618.69	$n_{R_{TOTAL}}$	28	$n_{D_{TOTAL}}$	4
$L_{TOTAL}(cm)$	8.86	Grietas por cm	3.16	Grietas por cm	0.45

Tabla 0-8. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 24B.

## 1.4 Probetas ensayadas al 60% de la carga de rotura

Muestra 21B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	23022.61	$n_{R1}$	3	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	23028.87	$n_{R2}$	4	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	22090.41	$n_{R3}$	6	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	22485.89	$n_{R4}$	2	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	90627.78	$n_{RTOTAL}$	15	$n_{DTOTAL}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	9.06	Grietas por cm	1.655	Grietas por cm	0

Tabla 0-9. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 21B.

Muestra 22B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	19228.82	$n_{R1}$	3	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	19508.48	$n_{R2}$	3	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	21745.77	$n_{R3}$	2	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	21158.2	$n_{R4}$	4	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	81641.27	$n_{RTOTAL}$	12	$n_{DTOTAL}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	8.16	Grietas por cm	1.47	Grietas por cm	0

Tabla 0-10. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 22B.

## 1.5 Probetas ensayadas al 50% de la carga de rotura

Muestra 11B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	33087.59	$n_{R1}$	1	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	33087.64	$n_{R2}$	2	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	32985.89	$n_{R3}$	0	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	99161.12	$n_{R_{TOTAL}}$	3	$n_{D_{TOTAL}}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	9.91	Grietas por cm	0.302	Grietas por cm	0

Tabla 0-11. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 11B.

Muestra 12B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	35372.9	$n_{R1}$	0	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	35415.27	$n_{R2}$	2	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	35968.95	$n_{R3}$	0	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	0	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	106757.12	$n_{R_{TOTAL}}$	2	$n_{D_{TOTAL}}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	10.67	Grietas por cm	0.187	Grietas por cm	0

Tabla 0-12. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 12B.

Muestra 13B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	30420.92	$n_{R1}$	1	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	28471.77	$n_{R2}$	0	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	30364.42	$n_{R3}$	1	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	29081.94	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	118339.05	$n_{RTOTAL}$	2	$n_{DTOTAL}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	11.83	Grietas por cm	0.169	Grietas por cm	0

Tabla 0-13. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 13B.

Muestra 14B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	34621.48	$n_{R1}$	1	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	34132.79	$n_{R2}$	0	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	34514.14	$n_{R3}$	2	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	34833.35	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	138101.76	$n_{RTOTAL}$	3	$n_{DTOTAL}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	13.81	Grietas por cm	0.217	Grietas por cm	0

Tabla 0-14. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 14B.

Muestra 15B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	33138.43	$n_{R1}$	0	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	33765.55	$n_{R2}$	0	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	33706.23	$n_{R3}$	1	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	33265.55	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	133875.76	$n_{RTOTAL}$	1	$n_{DTOTAL}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	13.39	Grietas por cm	0.0747	Grietas por cm	0

Tabla 0-15. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 15B.

## 1.6 Probetas ensayadas al 40% de la carga de rotura

Muestra 18B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	26019.787	$n_{R1}$	0	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	26889.844	$n_{R2}$	0	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	26889.844	$n_{R3}$	0	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	26889.844	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	106689.319	$n_{R_{TOTAL}}$	0	$n_{D_{TOTAL}}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	10.67	Grietas por cm	0	Grietas por cm	0

Tabla 0-16. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 18B.

Muestra 19B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	31833.348	$n_{R1}$	0	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	31093.234	$n_{R2}$	0	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	31542.389	$n_{R3}$	0	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	32016.965	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	126485.94	$n_{R_{TOTAL}}$	0	$n_{D_{TOTAL}}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	12.65	Grietas por cm	0	Grietas por cm	0

Tabla 0-17. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 19B

## 1.7 Probetas ensayadas al 30% de la carga de rotura

Muestra 16B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	31437.87	$n_{R1}$	0	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	30887.02	$n_{R2}$	0	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	32045.21	$n_{R3}$	0	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	30745.78	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	12511.88	$n_{RTOTAL}$	0	$n_{DTOTAL}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	12.51	Grietas por cm	0	Grietas por cm	0

Tabla 0-18. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 16B.

Muestra 17B					
Longitud		n° de grietas rectas		n° de grietas desviadas	
$L_{T1}(\mu m)$	30689.28	$n_{R1}$	0	$n_{D1}$	0
$L_{T2}(\mu m)$	34144.08	$n_{R2}$	0	$n_{D2}$	0
$L_{T3}(\mu m)$	32288.15	$n_{R3}$	0	$n_{D3}$	0
$L_{T4}(\mu m)$	30822.05	$n_{R4}$	0	$n_{D4}$	0
$L_{TOTAL}(\mu m)$	127943.56	$n_{RTOTAL}$	0	$n_{DTOTAL}$	0
$L_{TOTAL}(cm)$	12.79	Grietas por cm	0	Grietas por cm	0

Tabla 0-19. Densidad de grietas rectas y desviadas para la muestra 17B.